



Universidad
Carlos III de Madrid

PROYECTO FIN DE CARRERA
I.T.I. ELECTRICIDAD

EMPLEO DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REDES ELÉCTRICAS CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Autor: CARLOS AYUSO PLAZA

Tutora: MÓNICA ALONSO MARTÍNEZ

Índice

1.	Introducción	5
1.1.	Objetivo	7
1.2.	Estructura del documento.....	7
1.2.1.	Generación distribuida	7
1.2.2.	Técnicas metaheurísticas	7
1.2.3.	Optimización de redes eléctricas con generación distribuida	8
2.	Generación distribuida (GD).....	9
2.1.	Definición	9
2.2.	Tecnologías empleadas	11
2.2.1.	Cogeneración.....	12
2.2.2.	Solar.....	16
2.2.3.	Eólica	22
2.2.4.	Hidráulica	25
2.2.5.	Biomasa	28
2.2.6.	Pilas de combustible.....	30
2.2.7.	Volante de inercia	31
2.2.8.	Marina	31
2.2.9.	Geotérmica.....	36
2.3.	Situación actual y futuro de la generación distribuida	36
2.3.1.	A nivel mundial.....	36
2.3.2.	Caso español.....	40
3.	Técnicas Metaheurísticas	44
3.1.	Introducción	44
3.2.	Tipos de Técnicas Metaheurísticas.....	46
3.2.1.	Basadas en la trayectoria	46
3.2.2.	Basadas en población	53
3.3.	Evolución de las técnicas metaheurísticas	58
4.	Optimización de redes eléctricas con generación distribuida	59
4.1.	Introducción	59
4.2.	Objetivos	59

4.3.	Restricciones de optimización en un sistema con generación distribuida	60
4.3.1.	Límites de tensión en barras	60
4.3.2.	Límites de potencia a través de la subestación.....	60
4.3.3.	Pérdidas en la línea	61
4.3.4.	Límites de flujo de potencia	61
4.3.1.	61
4.3.2.	61
4.3.3.	61
4.3.4.	61
4.3.5.	Potencia suministrada por aerogenerador	61
4.3.6.	Potencia suministrada por unidad fotovoltaica	61
4.4.	Aplicaciones de técnicas metaheurísticas.....	62
4.4.1.	Artículos	62
4.4.2.	Comparativa entre técnicas	86
5.	Conclusiones.....	88
6.	Bibliografía	89

1. Introducción

La generación distribuida (GD o DG) no es término ideado en un pasado reciente, más bien todo lo contrario. Nos tendríamos que remontar a 1882 cuando Thomas Edison suministró en Nueva York a las industrias cercanas energía eléctrica, este sistema producía grandes pérdidas en forma de calor, ya que era de corriente continua. La idea de Edison era generar energía eléctrica donde se iba a consumir. El mismo año Nikola Tesla construyó el primer motor de corriente alterna y debido a las ventajas que tiene como unas pérdidas menores, un empresario llamado Westinghouse invirtió en el proyecto. La GD tiene un poco de ambas ideas, generar la energía eléctrica cerca de los puntos donde se va a consumir y con la característica de corriente alterna. La GD tiene un fuerte auge debido a diversos motivos:

-Irrupción nuevos sistemas de generación y su rápida implantación, en España hemos disminuido el ritmo de instalación, hemos pasado de tener en el 2000 una potencia instalada 20.503 MW a tener en 2014 una potencia de 50.017 MW, pero en los últimos años con las políticas energéticas aplicadas por el gobierno han hecho que en hayamos pasado de tener en 2012 una potencia de 49.156 MW, lo que significa que en 2 años apenas se han instalado unos 861 MW, como se pueden ver en los datos facilitados en el Ministerio de Industria, Energía y Turismo[1]

-Inestabilidad de producción de combustibles fósiles, la mayoría de los recursos están en países con una notable inestabilidad política, esto hace que el resto de los países dependan de dichos recursos, lo que conlleva una incertidumbre considerable. Como cabe de esperar los países intenten conseguir la mayor independencia energética posible, ya sea consiguiendo combustible fósiles con nuevos métodos como el "fracking", esto está pasando en EE.UU. o bien explotar los recursos propios como puede ser las energía renovables, por ejemplo el incremento de potencia instalada en Alemania, según Eurostats, en 2003 a tener 12.614 tep (toneladas equivalente de petróleo) a tener en 2013, 33.680 tep.

-Protocolo de Kioto donde se limitan las emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono→CO₂, gas metano→CH₄ y óxido nitroso→N₂O, Hidrofluorocarbonos→HFC, Perfluorocarbonos→PFC y Hexafluoruro de azufre→SF₆). Para el 2012 las emisiones deben

haberse reducido un 5% de las emisiones producidas en 1990, la producción de energía eléctrica está sujeta en muchos casos a la utilización de combustibles fósiles, estos producen CO₂. [2]

-La "impopularidad" de energía nuclear, cuando se habla de energía nuclear inconscientemente se viene a la cabeza la catástrofe de Chernóbil y más recientemente Fukushima, aunque en algunos países siguen implantándose este tipo de centrales no es lo normal. El miedo existe tanto en la ciudadanía cuando se plantea la instalación de una central nuclear como en los gobiernos cuando se plantea la instalación nuclear en un país donde su gobierno no es aliado, un ejemplo claro de este caso es Irán, donde los fines de la investigación no está del todo claro si es un fin puramente energético o hay un fin armamentístico.

-Llegada del coche eléctrico, si bien es una consecuencia de otros factores citados anteriormente, hace que si se implantase como medio de transporte mayoritario en los países desarrollados tendría como consecuencia un aumento notable del consumo de energía eléctrica.

- La tendencia a Smart Grid o en castellano, red inteligente. Las múltiples ventajas que puede tener una red que sepa adecuarse, tanto en tendencias de consumo, como en fiabilidad, como eficiencia energética, etc... la implantación ya ha comenzado con la instalación de contadores inteligentes o "smart meters", esto está ayudando al desarrollo de nuevas aplicaciones y modelos de negocio.

Por todos estos puntos la generación centralizada se hace complicada de mantener, estaríamos en un momento de transición entre la generación centralizada y distribuida, para que las redes eléctricas tengan un correcto crecimiento y funcionamiento pueden ser optimizadas mediante técnicas metaheurísticas, son métodos muy útiles para dar resultados a problemas de difícil solución y simplifican mucho los procesos hasta conseguirla.

1.1. **Objetivo**

El objetivo del presente proyecto fin de carrera (PFC) es analizar la aplicación de técnicas metaheurísticas para optimizar una red de distribución con generación distribuida. Esto se hará mediante el análisis de los resultados de estudios científicos, plasmados en forma de artículos. Se ha elegido varios por su interés debido al objetivo elegido a optimizar (costes, pérdidas, estabilidad, fiabilidad, etc...) o bien por el proceso que siguen para conseguir dicho objetivo.

1.2. **Estructura del documento**

El proyecto fin de carrera consta de tres partes diferenciadas:

1.2.1. Generación distribuida

En esta parte se definen distintas tecnologías empleadas y el impacto que ocasionan en las redes eléctricas. También analizaremos la situación actual y su tendencia tanto a nivel mundial como a nivel nacional. Se hará mención al primer sistema eléctrico con generación únicamente con renovables, sucedió la isla de El Hierro. Donde estuvo alimentado durante 4 horas con energías limpias.

1.2.2. Técnicas metaheurísticas

Se definirá que son y los tipos que hay, se clasificarán en función del proceso que siguen. Se desarrollaran las principales aunque al final del capítulo se hará mención de algunas técnicas que o bien son evoluciones de otras técnicas o que son menos conocidas pero que por sus buenos resultados son bastante empleadas.

1.2.3. Optimización de redes eléctricas con generación distribuida

Una vez explicado que es la generación distribuida y las técnicas metaheurísticas, se analizará las restricciones y los resultados al aplicarlas. Para ello, como ya hemos comentado anteriormente utilizaremos estudios ya realizados en artículos científicos.

La estructura del análisis será:

- Objetivo

El autor argumenta el motivo del trabajo y hace una breve introducción de conceptos que utilizará en el artículo

- Modelo a optimizar

Normalmente suelen ser modelos IEEE, con un determinado número de nodos, incluso en algunos casos pueden utilizarse modelos reales.

- Función objetivo y proceso de optimización

Es la parte más importante, la función si se plantea de manera errónea los resultados no serán válidos. Se tienen que realizar las simplificaciones necesarias, sino el proceso puede ser demasiado pesado, pero sin llegar a realizar simplificaciones demasiado grandes como para que los datos no sean relevantes. Desde hace unos años, los artículos suelen tener funciones multiobjetivos, es decir se aprovecha el proceso de optimización para obtener más de un resultado.

- Presentación de resultados y conclusiones

Después de utilizar la función objetivo y someterla a un proceso de optimización con las técnicas metaheurísticas, se calculan los resultados. En algunos casos para determinar si la calidad es buena, se comparan con otros procesos de optimización (control de calidad del proceso de optimización). Estos procesos se suelen hacer con otras técnicas metaheurísticas o con otros métodos, incluso se puede optimizar un sistema con los resultados ya conocidos y calcular las desviaciones que se producen.

2. Generación distribuida (GD)

2.1. Definición

Se pueden encontrar multitud de definiciones, ya que los organismos que ha dictaminado que es la generación distribuida no coinciden en algún factor, esto es debido a que dependen de múltiples que la condicionan: límite potencia, tecnologías empleadas, conexión a la red.

Entre las que cabe destacar están por ejemplo:

-Agencia Internacional de la Energía (IEA): *"Producción de energía en las instalaciones de los consumidores o en las instalaciones de la empresa distribuidora, suministrando energía directamente a la red de distribución."*

-Distribution Power Coalition of America (DPCA): cualquier tecnología de generación a pequeña escala que abastece desde puntos cercanos al consumidor o a la red de transporte o distribución, para ello se ha elaborado una norma IEEE 1547 [23].

-N.Jenkins," Embedded Generation": Los autores mencionan una serie de características de la generación distribuida:

- No debe ser planificada centralmente.
- No debe transportarse a distancias lejanas o programarse centralmente.
- Potencias normalmente inferiores a 50 ó 100 MW.
- Normalmente conectadas a redes de distribución ($V \leq 145$ kV)

Si se determina que es GD por el rango de potencia, se puede ver en la tabla 1 que dependiendo del país variará.

País	Rango potencia
EEUU (Electric Power Research Institute)	De unos pocos KW hasta 50MW
España (régimen especial)	Máximo 50 MW
Reino Unido (EscoVale Consultancy)	Desde 10MW hasta 100MW

Tabla 1 Potencia de GD

Se podría rellenar numerosas páginas con definiciones todas, pero N. Jenkins lo define brevemente: no debe ser planificada centralmente, es decir la generación distribuida es lo contrario a la generación centralizada.

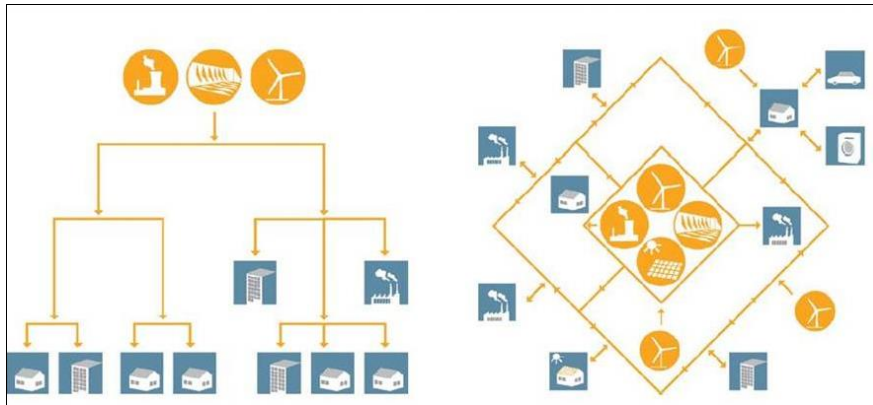


Figura 1 Generación centralizada VS Generación distribuida

La figura 1 muestra lo que sería un sistema de generación centralizada (izquierda) y un sistema de generación distribuida (derecha). En el sistema centralizado la energía se genera en grandes centrales y se transporta para ser consumida, mientras que en un sistema distribuido, la energía es generada cerca del punto de consumo.

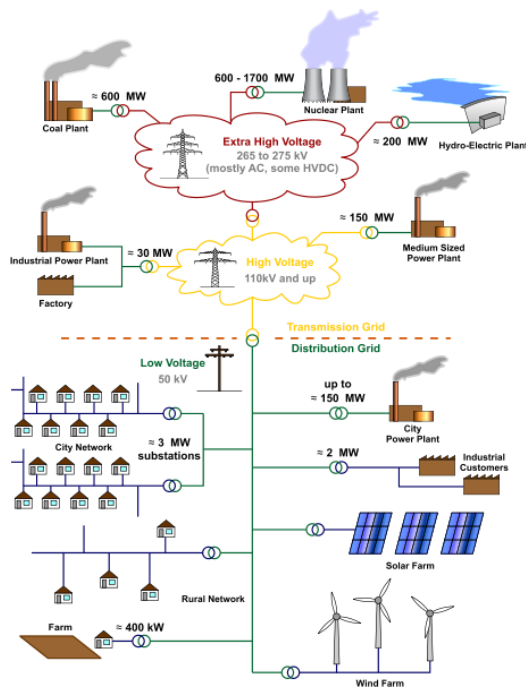


Figura 2 Generación eléctrica distribuida

En la figura 2 se puede ver en más detalle cómo es un sistema con generación distribuida, donde la red es alimentada por las diferentes centrales dentro de la propia red y también tiene el respaldo de la generación tradicional o centralizada.

2.2. Tecnologías empleadas

Para concretar que tecnologías se pueden agrupar dentro de la generación distribuida se podría “asimilar” con el Régimen Especial, ya que por definición según la ley 54/1997 en su artículo 27:

1. La actividad de producción de energía eléctrica tendrá la consideración de producción en régimen especial en los siguientes casos, cuando se realice desde instalaciones cuya potencia instalada no supere los 50 MW:

a) Instalaciones que utilicen la cogeneración u otras formas de producción de electricidad asociadas a actividades no eléctricas siempre que supongan un alto rendimiento energético.

b) Cuando se utilice como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa o cualquier tipo de biocarburante, siempre y cuando su titular no realice actividades de producción en el régimen ordinario.

c) Cuando se utilicen como energía primaria residuos no renovables. También tendrá la consideración de producción en régimen especial la producción de energía eléctrica desde instalaciones de tratamiento y reducción de los residuos de los sectores agrícola, ganadero y de servicios, con una potencia instalada igual o inferior a 25 MW, cuando supongan un alto rendimiento energético.

Por lo que podremos incluir dentro de tecnologías de generación distribuida:

- Cogeneración
- Solar
- Eólica
- Hidráulica
- Biomasa, residuos y tratamiento de residuos

A pesar que esta similitud es buena, el régimen especial deja fuera sistemas de generación como las pilas de combustible o los volantes de inercia, y tecnologías emergentes como la marina o geotérmica. Si bien las pilas y los volantes se pueden considerar como elementos de maniobra, es decir sistemas de respaldo ante fallos puntuales para garantizar el suministro. Las tecnologías como la marina y la

geotérmica tienen una presencia mayor, aunque son tecnologías en desarrollo.

2.2.1. Cogeneración

Los sistemas de cogeneración son sistemas en los cuales se produce conjuntamente electricidad (o energía mecánica) y de energía térmica útil (calor) partiendo de un único combustible, como se puede apreciar en la figura 3. El gas natural suele ser la energía primaria más utilizada para el funcionamiento de las centrales de cogeneración de electricidad-calor. Que suela ser no quiere decir que sea la única, también se pueden utilizar fuentes de energía renovables y residuos como biomasa o residuos que se incineran.

En una central eléctrica tradicional con turbina de gas natural los humos salen directamente por la chimenea, mientras que en una planta de cogeneración los gases de escape se enfrían transmitiendo su energía a un circuito de agua caliente/vapor. Una vez enfriados los gases de escape pasan a la chimenea. En el caso de que la turbina sea de vapor, este a la salida de la turbina transmite una energía calorífica al circuito de agua caliente/vapor.

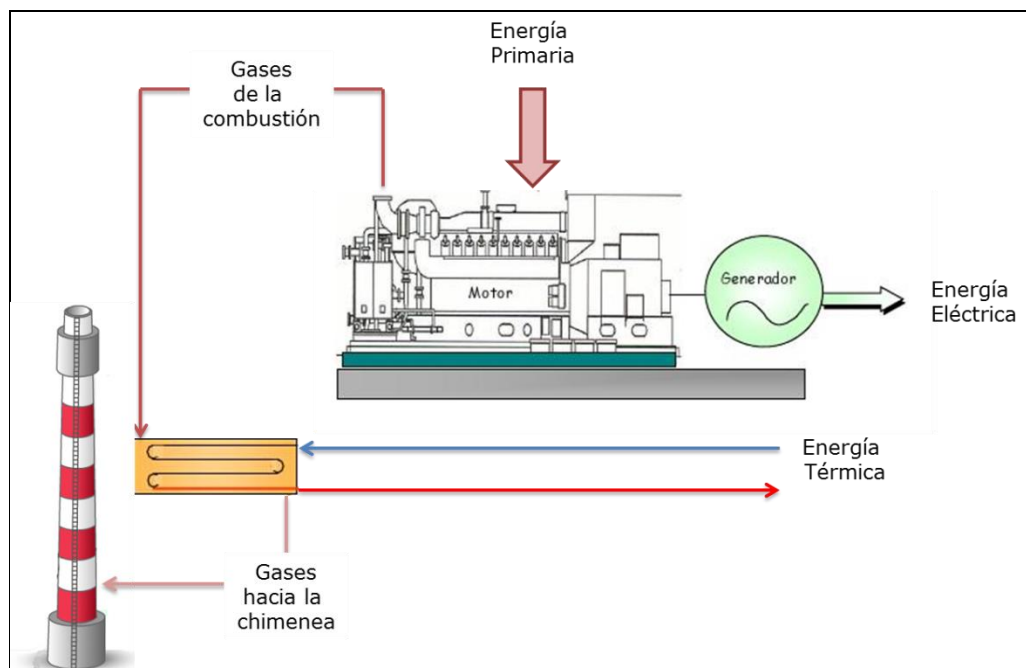


Figura 3 Central de cogeneración

El aprovechamiento del calor residual hace que los sistemas de cogeneración puedan tener rendimientos del 85%, esto hace que se

obtengan elevados índices de ahorro energético y económico, sin alterar el proceso productivo.

El motivo de que la materia prima más común sea el gas natural es entre otros motivos porque el procedimiento es más ecológico, ya que durante la combustión el gas natural libera menos dióxido de carbono (CO₂) y óxido de nitrógeno (NOX) que el petróleo o el carbón, esto ayuda a cumplir los objetivos fijados en el Protocolo de Kioto.

VENTAJAS:

- Ahorro energético y mejora la continuidad del abastecimiento.
- Disminución sobre las pérdidas de la red eléctrica, ya que están próximas a los lugares de consumo (GD).
- Aumento de la competencia entre los productores.
- Se adapta bien a las zonas aisladas.

La cogeneración se puede clasificar en:

2.2.1.1. Plantas con motores alternativos

El combustible empleado es gas, gasóleo o fuel-oil, son eficientes tanto eléctricamente como térmicamente. El sistema de recuperación térmica se diseña en función de los requisitos de la industria, debido a su corto tiempo de arranque consigue tener una gran versatilidad.

2.2.1.2. Plantas con turbinas de vapor

Este sistema es típico en centrales térmicas convencionales, la energía mecánica que se aprovecha se produce por la expansión del vapor de alta presión procedente de una caldera convencional.

El uso de esta turbina fue el primero en cogeneración, actualmente su uso se ha visto reducido a ciclos combinados o en instalaciones que utilizan combustibles residuales, como biomasa o residuos que se incineran.

2.2.1.3. Plantas con turbinas de gas

En los sistemas con turbina de gas se quema combustible en un turbogenerador, cediendo parte de su energía para producir energía mecánica. Su rendimiento es bajo pero presentan la ventaja de que permiten una recuperación fácil del calor, al producirse un intercambio térmico con los gases de escape.

Es una excelente opción para plantas de cogeneración, ya que disponen de una gran rapidez a cambios de demanda, por este motivo se encuentra fácilmente en numerosas industrias (alimentación, química, papelera, etc...). Son plantas de gran fiabilidad y económicamente rentables cuando están diseñadas para una aplicación determinada, un inconveniente de estas turbinas es que su potencia se ve afectada por las condiciones ambientales (presión, temperatura y humedad).

2.2.1.4. Ciclo combinado

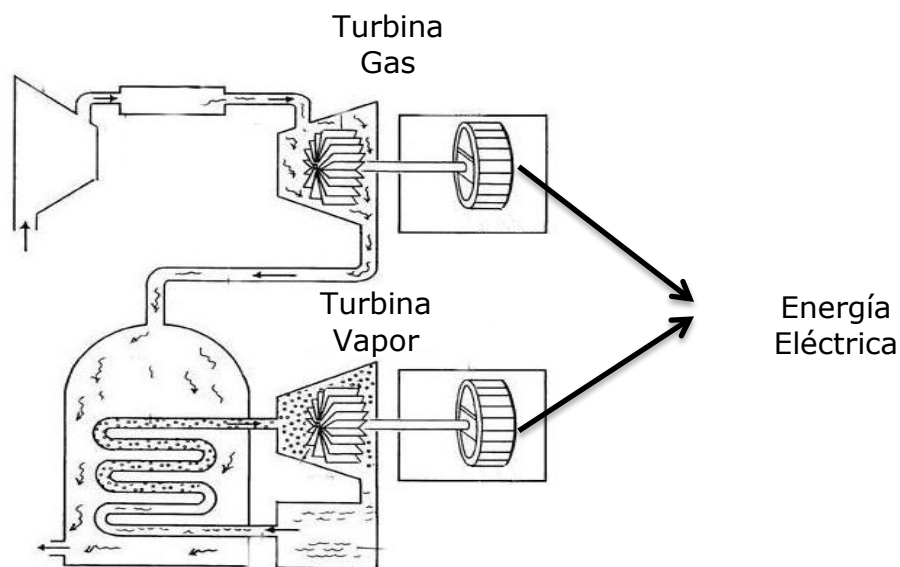


Figura 4 Central de ciclo combinado

Un ciclo combinado es un acoplamiento de dos ciclos termodinámicos: uno de alta temperatura (turbina gas) y otro de baja temperatura (turbina de vapor), como se puede apreciar en la figura 4. Para ello el calor del gas combustionado es aprovechado para conseguir vapor, que hará funcionar la turbina de vapor.

En un ciclo combinado se consigue altos rendimientos debido a la combinación de ambas turbinas, este sistema se utiliza en aplicaciones de cogeneración de dimensiones grandes.

Una variante del ciclo combinado, es el ciclo combinado a condensación

2.2.1.5. Trigeneración

Se basa en la producción conjunta de calor, electricidad y frío. Una planta de trigeneración es similar a una de cogeneración, pero con la diferencia que se le ha añadido un sistema de absorción para la producción de frío.

La trigeneración tienen multitud de aplicaciones, donde se está extendiendo es el sector terciario donde además de necesidades de calefacción y agua caliente se requieren importantes cantidades de frío para climatización, que consume una gran proporción de la demanda eléctrica. La estacionalidad de estos consumos (calefacción en invierno y climatización en verano) impediría la normal operación de una planta de cogeneración clásica.

2.2.1.6. Motor alternativo

En los sistemas basados en motores alternativos, el elemento motriz es un motor de explosión. El calor recuperable se encuentra en forma de gases calientes y agua caliente (Circuito Refrigeración).

Si se expresa una comparativa entre algunas ventajas y desventajas de los diferentes tipos de generación, se puede representar la tabla 2.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Turbina de gas	Amplia gama de aplicaciones	Limitación en los combustibles
	Muy fiable	
	Elevada temperatura de la energía térmica	
	Rango desde 0,5 a 100 MW	Tiempo de vida relativamente corto
	Gases con alto contenido en oxígeno	

Turbina de vapor	Rendimiento global muy alto	Baja relación electricidad/calor
	Extremadamente segura	
	Posibilidad de emplear todo tipo de combustibles	No permite alcanzar altas potencias eléctricas
	Larga vida de servicio	
	Amplia gama de potencias	Puesta en marcha lenta
	Coste elevado	
Motor alternativo	Elevada relación electricidad/calor	Alto coste de mantenimiento
	Alto rendimiento eléctrico	
	Bajo coste	
	Tiempo de vida largo	Energía térmica muy distribuida y a baja temperatura
	Capacidad de adaptación a variaciones de la demanda	

Tabla 2 COGENERACIÓN- Ventajas VS Contras

2.2.2. Solar

Basada en la transformación de la radiación proveniente del Sol en energía eléctrica. Hay distintos métodos para su transformación:

2.2.2.1. Solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es un tipo de las llamadas electricidad renovable, se obtiene directamente de los rayos del sol gracias a la foto-detección de un determinado dispositivo; normalmente una lámina metálica semiconductora llamada célula fotovoltaica o una deposición de metales sobre un sustrato llamada capa fina. La corriente eléctrica continua que proporcionan los módulos fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna mediante un inversor



Figura 5 Solar fotovoltaico

La generación fotovoltaica puede clasificarse según su funcionamiento:

- Autónomos.
Se utiliza en sitios donde no hay acceso a la red de distribución
- Híbridos o mixtos
Se conectan en paralelo a otra fuente de generación
- Conectados a la red
Mediante un inversor la energía eléctrica es entregada a la red de distribución

Una instalación fotovoltaica se compone de:

- Sistema de generación: Paneles

Material	Rendimiento
Silicio monocristalino	15-17 %
Silicio policristalino	12-14 %
Silicio amorfo	Menor del 10 %
Teluro de cadmio (Cd Te)	8-14 %
Diseleniuro de indio-cobre(Cu In Se ₂ o CIS)	Entorno 17 %
Arseniuro de galio (Ga As)	15-17 %

Tabla 3 Rendimiento paneles solares

El rendimiento de estas células viene a ser de entre un 12 % y un 25 %, como se puede apreciar en la tabla 3. El rendimiento depende de la temperatura.

- Sistema de regulación de carga: asociado al sistema de acumulación de energía, controla la carga y descarga de las baterías y las protege frente a la sobrecarga y la sobredescarga.
- Sistema de acumulación: se encarga de proporcionar energía en horas de baja o nula insolación, almacenar la energía que excede la demanda y satisfacer picos instantáneos de demanda. Es un elemento opcional para sistemas conectados a la red. El sistema que mejor se adapta a este tipo de generación es la batería de plomo-ácido.
- Sistema de interconexión (inversor, protecciones y contador).

2.2.2.2. Solar térmica

Este método está en desarrollo aunque el modo de obtención de energía eléctrica es el de la obtención de vapor para que mueva una turbina. Principalmente hay tres métodos:

2.2.2.2.1 Colectores cilindro-parabólicos

En este método se utilizan espejos cilindro-parabólicos para concentrar los rayos del Sol en un tubo que contiene el fluido a calentar, este es llevado mediante una bomba a un intercambiador de calor donde el calor es absorbido por el agua y llevado a la turbina de vapor. Como se puede apreciar en la primera parte de la figura 6, los espejos son móviles y se orientan de modo que la radiación sea la mayor posible. En la segunda parte de la figura 6, se muestra una foto real, se puede apreciar el tamaño de espejos en comparación de una persona.

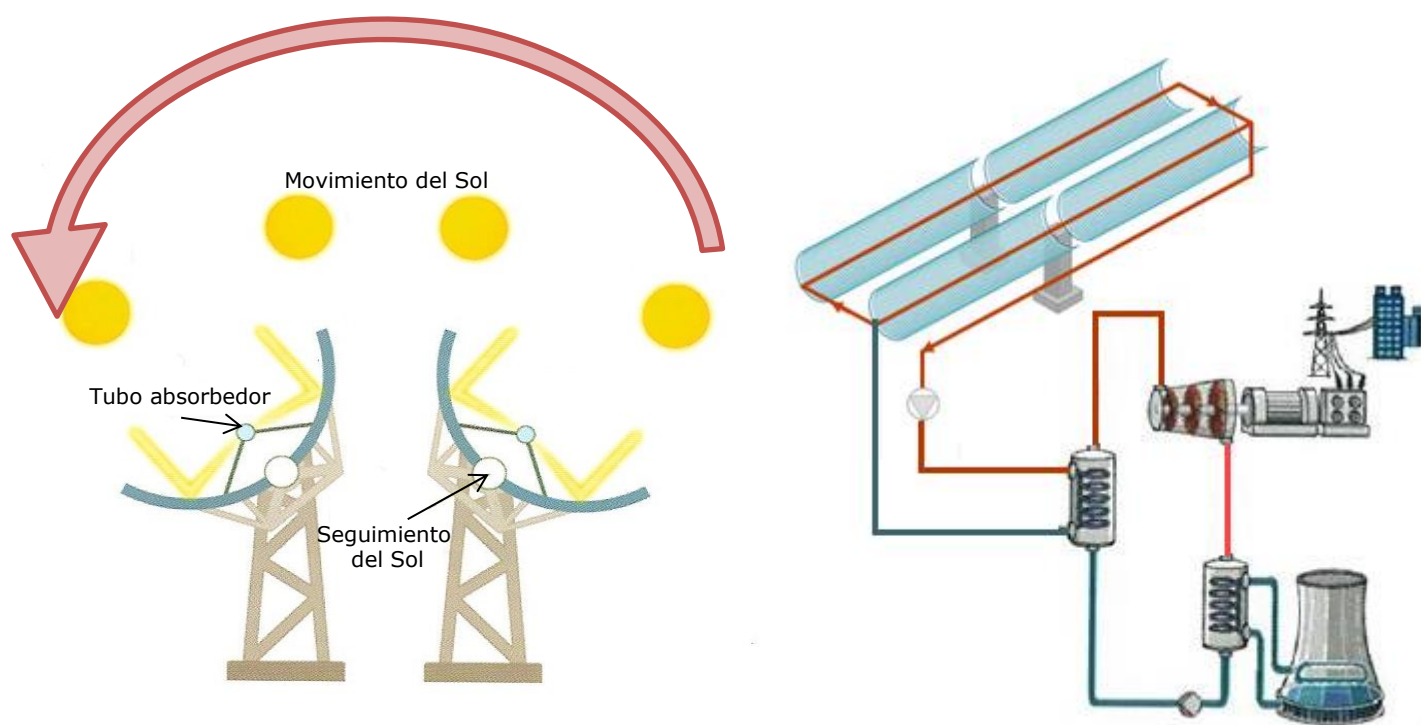


Figura 6 Colectores cilíndricos-parabólicos



Figura 6 Colectores cilíndricos-parabólicos

2.2.2.2.2 Torre central o helióstatos

Esta vez los espejos son planos y están apuntando a una torre central donde se concentra toda la radiación reflejada, como se puede apreciar en la figura 7. El número de espejos suele contarse por cientos o incluso por miles y de gran tamaño para que no sea numeroso los mecanismos de direccionamiento.



Figura 7 Torre central o helióstatos

Como se puede apreciar en la figura 8, en la torre está la caldera donde se calienta el agua hasta conseguir vapor, tras pasar por la unidad de almacenamiento térmico irá a la turbina para generar energía eléctrica. El agua vuelve a la caldera tras ser enfriado en el condensador.

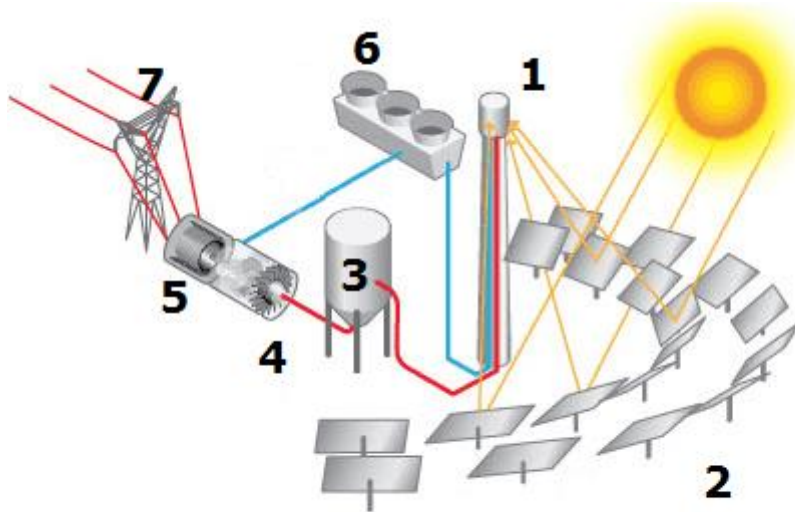


Figura 8 Funcionamiento torre central o helióstatos

1. Caldera
2. Campo de helióstatos
- 3 Almacenamiento térmico
4. Generador de vapor
5. Turbo-alternador
6. Aero-condensador
7. Líneas de transporte de energía eléctrica

2.2.2.2.3 Discos parabólicos



Figura 9 Discos parabólicos

El reflector concentra la radiación solar en un concentrador, este hace que se acumule la energía térmica, el principio de funcionamiento es la expansión y contracción de un gas (helio, hidrógeno, nitrógeno o simplemente aire) al ser obligado a seguir un ciclo de enfriamiento en un foco frío, con lo cual se contrae, y de calentamiento en un foco caliente (el receptor de la energía solar en este caso), con lo cual se expande. Es decir, es necesaria la presencia de una diferencia de temperaturas entre dos focos, este tipo de motores se llama Stirling. De todos los métodos de energía solar este es el que tiene un mayor rendimiento.

Si representamos algunas de las ventajas y desventajas de la energía solar, se puede realizar la tabla 4.

Tipo		Ventajas	Inconvenientes
Fotovoltaica	Gran extensión (huertos solares)	Limpios, silenciosos y no causa daño al medio ambiente	Limitada capacidad de almacenamiento
		Capaz de generar electricidad con radiación difusa	
	Integración arquitectónica	Mantenimiento bajo	Rendimiento limitado
		Vida panel 25 a 30 años	
Térmica	Colectores cilindro-parabólicos	Mayor eficiencia	Alto coste de mantenimiento
	Torre central o helióstatos	Acumulación de energía (tanques sales fundidas)	Puesta en marcha lenta
	Discos parabólicos	Puede tener un sistema de respaldo en momentos valle de radiación solar	Gran superficie necesaria para operar

Tabla 4 Solar - Ventajas VS Contrás

2.2.3. Eólica

Este sistema consiste en aprovechar la energía cinética de las corrientes de aire (viento) en energía eléctrica, la idea de aprovechar el viento no es actual en la antigüedad corresponde a Hero de Alejandría, fechada en el siglo I o II a.C., se trataba de un molino de viento de eje horizontal usado para mover el fuelle de un órgano, en la actualidad también se denominan comúnmente molinos aunque el término más adecuado son aerogeneradores.

Este sistema es bastante maduro y cada vez se va extendiendo más. Económicamente son muy rentables ya que en un breve periodo de tiempo (2 a 7 años) se amortiza la inversión.

El aerogenerador puede ser de dos tipos, síncrono o asíncrono. Aunque la tendencia es la utilización de asíncronos ya que tienen una mayor robustez, mayor facilidad de conexión a red y el sistema de control es más sencillo, por contra tienen que estar conectados a la red para funcionar mientras que los síncronos son autónomos.



Figura 10 Campo de aerogeneradores

Las partes de un aerogenerador se pueden apreciar en la figura 11

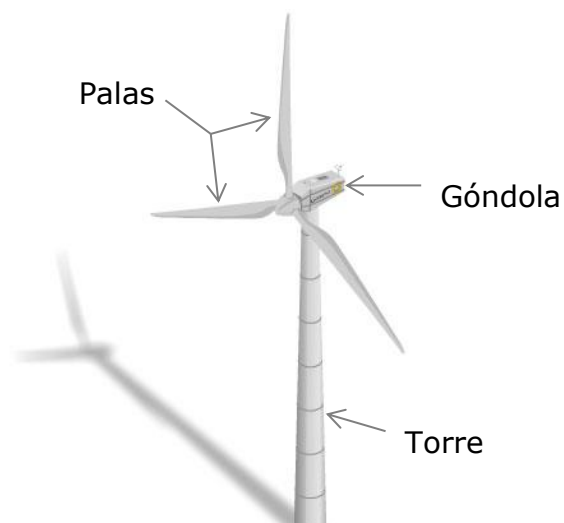


Figura 11 Partes aerogenerador

- **Palas:** El número de palas normalmente es de dos o tres, son las encargadas de aprovechar la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica rotativa. Debido a que la intensidad del viento no es constante las palas giran para que el giro sea lo más uniforme posible. El aerogenerador tiene unos márgenes de trabajo máximo y mínimo en cuanto a intensidad de viento se refiere, dentro de estos márgenes el aerogenerador puede funcionar (figura 12 - izquierda) pero fuera de ellos las palas se colocaran de tal forma que el viento no las haga girar (figura 12 - derecha).

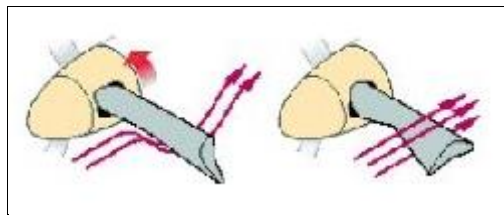


Figura 12 Palas aerogenerador

- **Góndola:** Protege de las inclemencias a los dispositivos que transforman la energía mecánica rotativa en energía eléctrica.

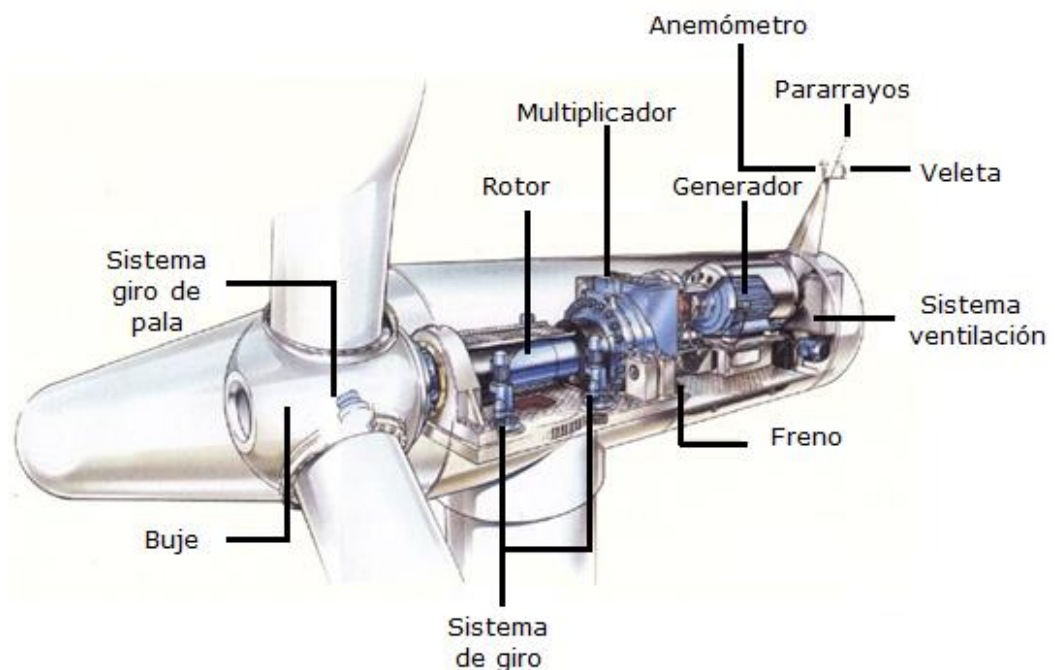


Figura 13 Góndola aerogenerador

- Torre: Encargada de soportar a la góndola y las palas, pueden ser de acero, de celosía o de hormigón en grandes aerogeneradores, mientras que en pequeños se puede utilizar un mástil con cables tensados.



Figura 14 Torre aerogenerador

En grandes aerogeneradores sirven como acceso a la góndola.

La tabla 5 representa algunas ventajas e inconvenientes de la generación mediante energía eólica.

Ventajas	Inconvenientes
No contamina	Alta inversión inicial
Inagotable	Dificultad prever viento
Tecnología madura	
Rentable	Ruidoso
Rendimiento (46%)	

Tabla 5 AEROGENERADOR - Ventajas VS Contras

2.2.4. Hidráulica

Cuando se menciona la generación hidráulica en régimen especial, lo hacemos cuando hablamos de mini-hidráulicas. La idea es similar a sus hermanas mayores, aprovechar la energía cinética del agua para mover una turbina originándose así energía eléctrica, la diferencia de una de las otras es que la

mini-hidráulicas sus estructuras están en canales y en presas que regulan el caudal de un río.



Figura 15 Mini- hidráulica

Se puede clasificar por el tipo de caudal:

- Central de agua fluyente o derivación, parte del caudal es desviado hacia la turbina para ser más tarde devuelto. El caudal es variable y está ligado al régimen hidrológico del río
- Central embalse o de regulación, en este caso se construye una presa en el río formándose una presa que almacena agua. La turbina puede estar en la presa o más alejada dependiendo del salto de agua para el cuál ha sido diseñada.

Si se observa la figura 16, se puede ver que el tipo de turbina viene determinada por el caudal y por el salto.

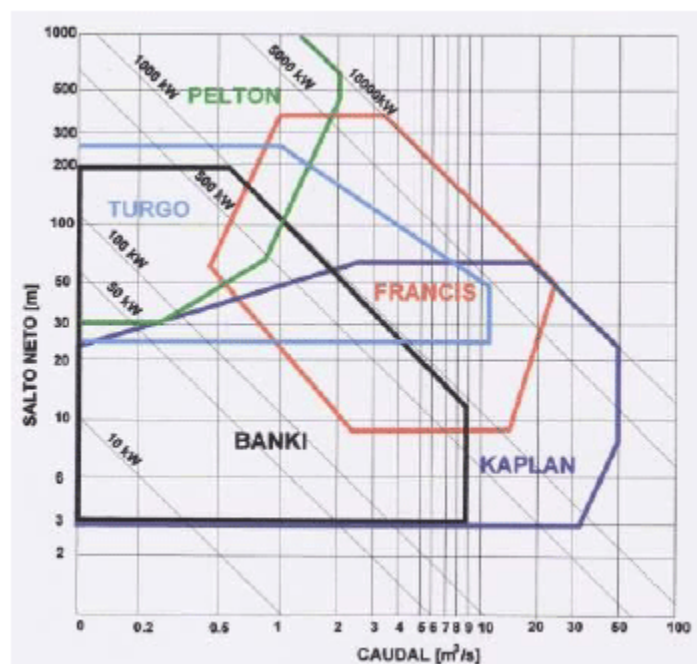


Figura 16 Diagrama tipo turbina hidráulica

A grandes saltos y poco caudal la elección tenderá a turbinas Pelton (de acción) donde la presión se transforma en energía cinética por el inyector. Según se disminuye el salto se escogerá de tipo Turgo o Banki-Michell (flujo transversal) si el caudal es bajo pero si por el contrario el caudal es considerable se elegirá tipo Francis (flujo mixto). Si el salto continúa disminuyendo a bajos caudales se podrá elegir turbinas Banki-Michell o Kaplan, pero si el caudal es alto únicamente se elegirá del tipo Kaplan.

Las turbinas más utilizadas son las Francis, Pelton y Kaplan. Estas se pueden ver en la figura 17, donde se muestra como son y cómo el caudal las hace girar.

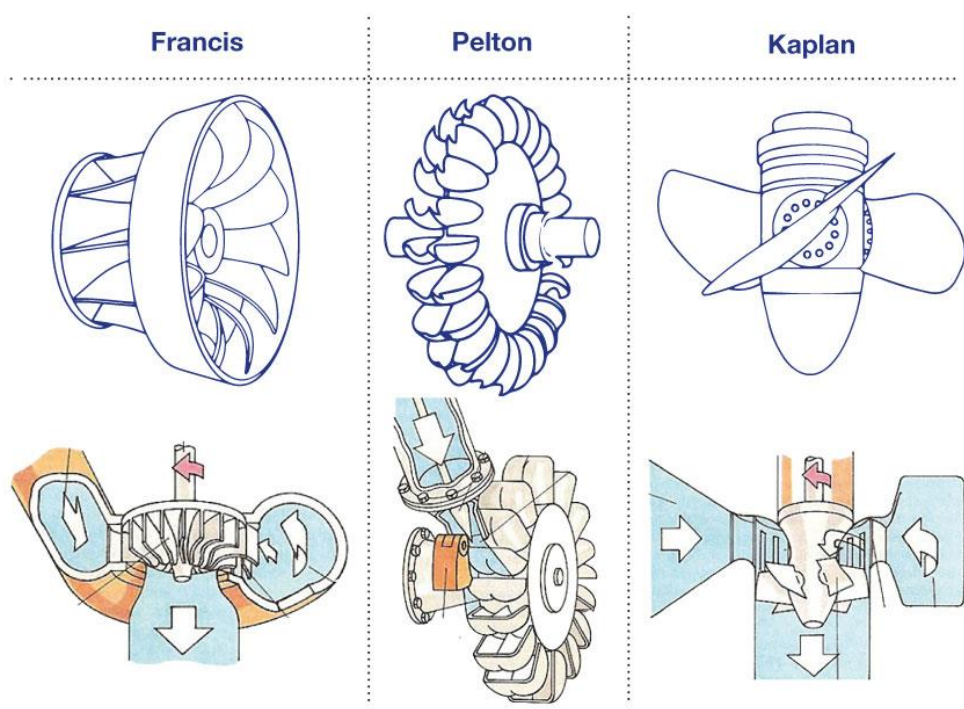


Figura 17 Tipo turbina hidráulica

En la tabla 6 se puede apreciar algunas ventajas e inconvenientes.

Ventajas	Inconvenientes
No contamina	Alta inversión inicial
Tecnología madura	
Rentable	Impacto ambiental
Rendimiento alto (cerca 90%)	

Tabla 6 HIDRÁULICA - Ventajas VS Contras

2.2.5. Biomasa

Se conoce como biomasa al conjunto de materia orgánica, de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial.

Se puede clasificar el tipo de biomasa por la fuente que genera la materia prima:

- Natural. Como bien dice su nombre, se genera de manera natural. Económicamente inviable ya que habría que realizar un gran gasto para obtener una cantidad de combustible adecuado.
- Biomasa residual seca. Subproductos sólidos no utilizados en las actividades agrícolas, en las forestales y en los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera y que, por tanto, son considerados residuos. Presenta un gran interés desde el punto de vista del aprovechamiento industrial, ya que nuestro país es abundante este tipo de residuos.
- Biomasa residual húmeda. Son los vertidos denominados biodegradables. Las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos. Se estima que puede haber unos 40 millones de toneladas de residuos ganaderos que podría ser convertido en unos 2.000 millones de metros cúbicos de biogás con un potencial energético de 1,2 tep/año.
- Cultivos energéticos son cultivos realizados con la única finalidad de producir biomasa. Los cultivos que se suelen labrar se caracterizan por dos aspectos concretos: Por su alta producción por unidad de superficie/año y por los pocos requerimientos que exige su cultivo.
- Biocarburantes: aunque su origen se encuentra en la transformación de los anteriores tipos de biomasa, por sus especiales características y usos finales este tipo de biomasa exige una clasificación distinta de las anteriores. Algunos combustibles pueden obtenerse de la biomasa directamente por extracción (plantas productoras de hidrocarburos), pero es más frecuente someter la biomasa a distintas manipulaciones para su transformación en combustibles. Estas transformaciones pueden dividirse en dos grupos: procesos termoquímicos y procesos bioquímicos.

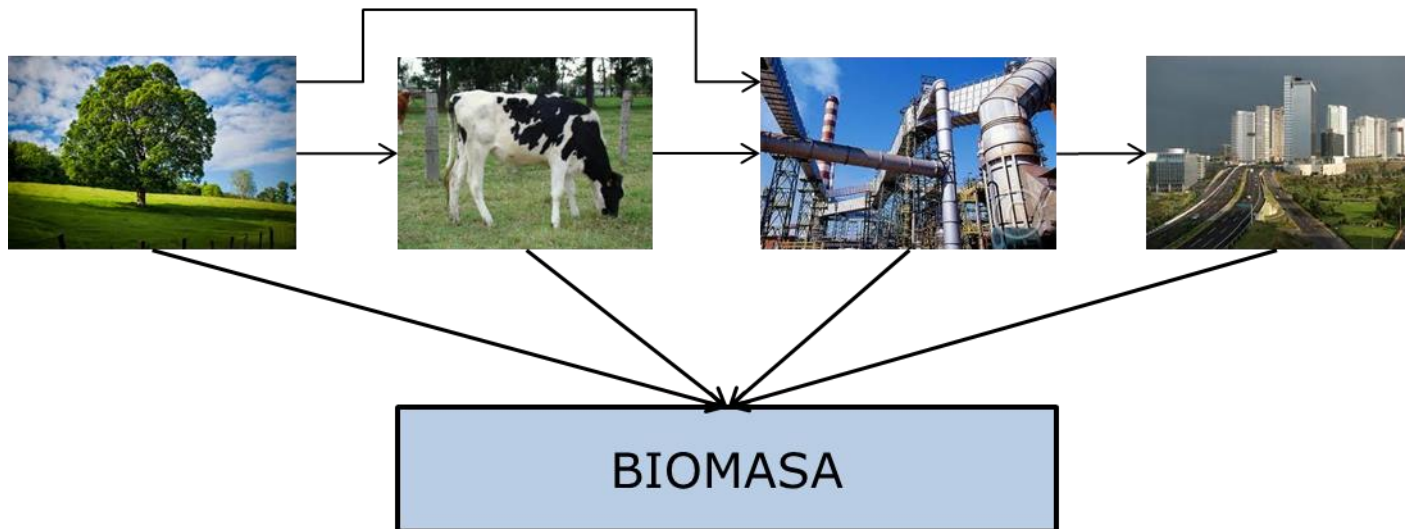


Figura 18 Biomasa

Su utilización para generar energía eléctrica es bastante variada, desde con ciclo de vapor a combustión de biodiesel en un motor alternativo, son solo unos ejemplos de lo repartido que esta su utilización.

Una mención especial debe tener los residuos, entendiéndose por estos los desperdicios que no se ajustan a las definiciones anteriores como por ejemplo:

- Gas residual
- Residuos industriales
- Residuos sólidos urbanos
- Productos no comerciales de explotaciones mineras

En cuanto a lo económico el residuo más rentable es de los sólidos urbanos, ya que los ciudadanos del municipio sufragan el gasto de recogida y únicamente habría que invertir en su tratamiento. Otro recurso rentable sería el de la gasificación de vertederos.

En la tabla 7 se pueden observar algunas ventajas e inconvenientes de la biomasa

Ventajas	Inconvenientes
Elevada materia prima procedente de materiales residuales	Bajo poder de combustión
Bajo coste materia prima	Impacto estético
	Largo proceso para obtener materia prima
No contamina	Tecnología poco madura
	Alto coste

Tabla 7 BIOMASA - Ventajas VS Contrás

2.2.6. Pilas de combustible

Son dispositivos que transforman la energía química en energía eléctrica, el funcionamiento se basa en la reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno, en esta reacción se genera agua, calor y electricidad. En aspectos generales es similar a una pila convencional, tenemos un ánodo (H) y un cátodo (O). Como se puede observar en la figura 19.

El ion de hidrógeno inicia su marcha hacia el cátodo, donde se combina con el oxígeno para formar agua.

Es una tecnología experimental que tiene un rendimiento aproximado del 35-50%, limpia y con una gran seguridad de suministro.

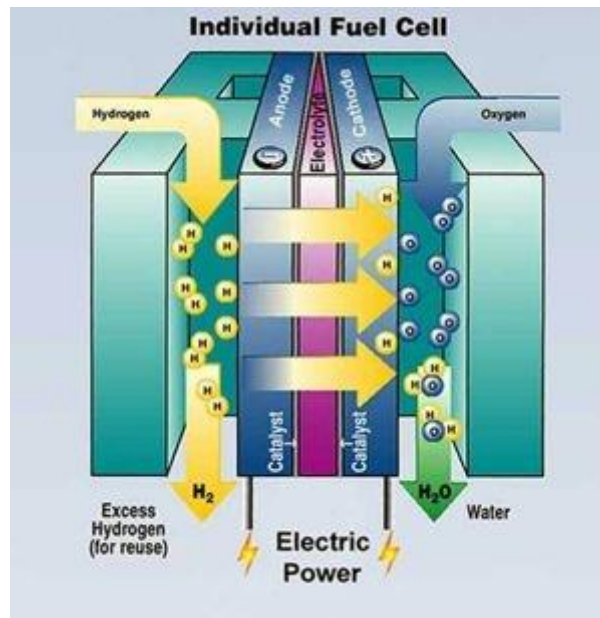


Figura 19 Pila combustible

Se trata de un sistema de almacenamiento más que un sistema de generación, su función es como respaldo de otros sistemas.

Algunas ventajas e inconvenientes se pueden apreciar en la tabla 8.

Ventajas	Inconvenientes
Conexión modular	Alto coste
Eficiencia constante (desde 30% a 100% de carga)	Degradación electrolito
No contamina	Tecnología experimental
Rendimiento alto (95%)	Potencias muy limitadas

Tabla 8 Pila combustible - Ventajas VS Contra

2.2.7. Volante de inercia

Es un sistema de almacenamiento de energía y no de generación, su función es importante en la regulación primaria del control frecuencia-potencia.

En un primer instante el volante almacena energía cinética de rotación mediante el giro de una masa (volante), es decir el motor da energía al volante de inercia. Cuando se necesita la energía eléctrica, el motor se comporta como un generador y la energía cinética es liberada creando energía eléctrica en un generador.

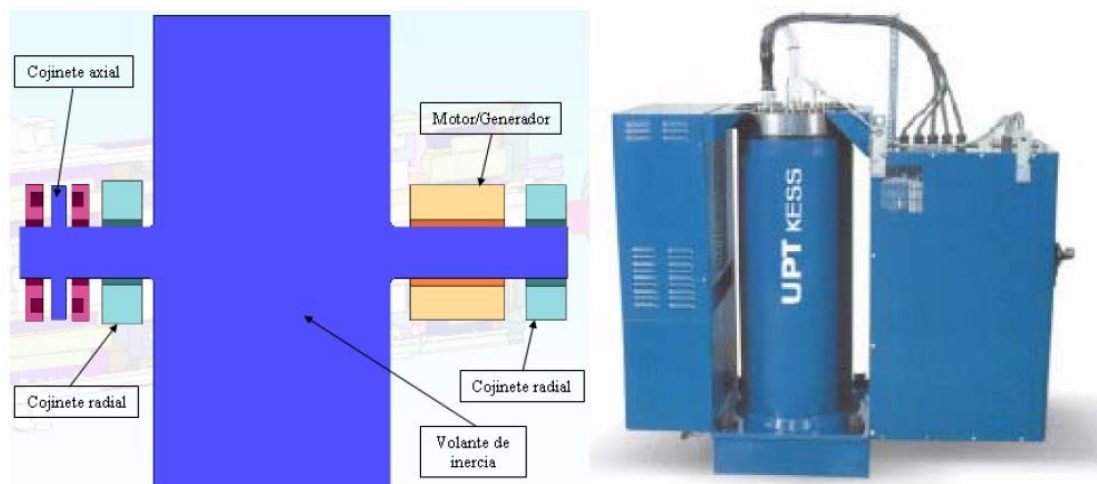


Figura 20 Volante de inercia

2.2.8. Marina

Comprende cualquier aprovechamiento energético del mar ya sea la energía cinética de las olas, las corrientes marinas o la energía térmica oceánica. Este tipo de tecnología está en desarrollo y posee un elevado coste económico.

2.2.8.1. Mareomotriz (mareas)

Se fundamenta en el ascenso-descenso de nivel que produce la atracción gravitacional entre la Tierra y la Luna. Como se puede apreciar en la figura 20, el agua se almacena cuando hay marea alta y cuando hay marea baja la turbina funciona por la diferencia de potencial entre ambos niveles de agua.

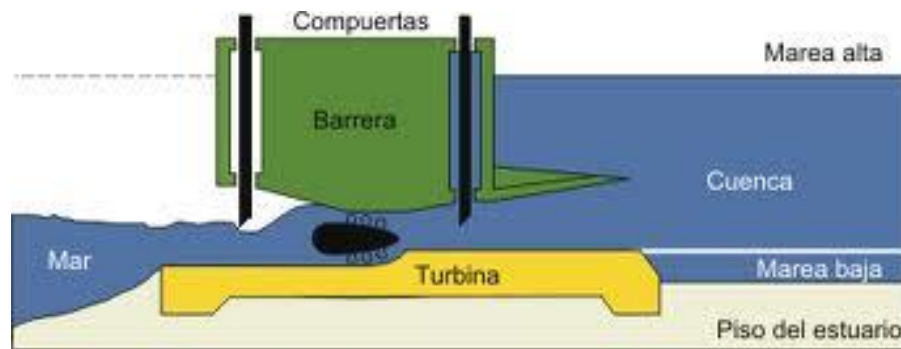


Figura 21 Mareomotriz

2.2.8.2. Corrientes marinas

Aprovecha el flujo de corriente marina para producir electricidad.



Figura 22 Corrientes marinas

2.2.8.3. Undimotriz (olas)

Aprovecha la acción del viento sobre la superficie del mar que provoca su movimiento en forma de olas. Hay distintos métodos para aprovechar la energía de las olas.

3.2.8.3.1. Puerta basculante

La presión ejercida por las olas, hace que se bombee agua a alta presión a la planta donde se genera energía eléctrica

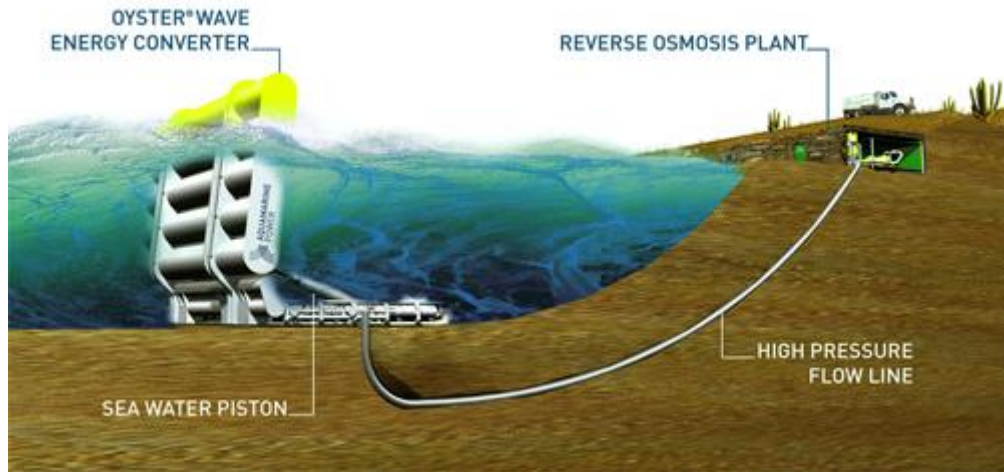


Figura 23 Puerta basculante

3.2.8.3.2. Boyas de absorción

Para aprovechar la energía de las olas, las boyas están sujetas a una estructura mucho más pesada que apenas se mueve, como se aprecia en la figura 25. La oscilación de las olas se aprovecha para crear energía eléctrica.

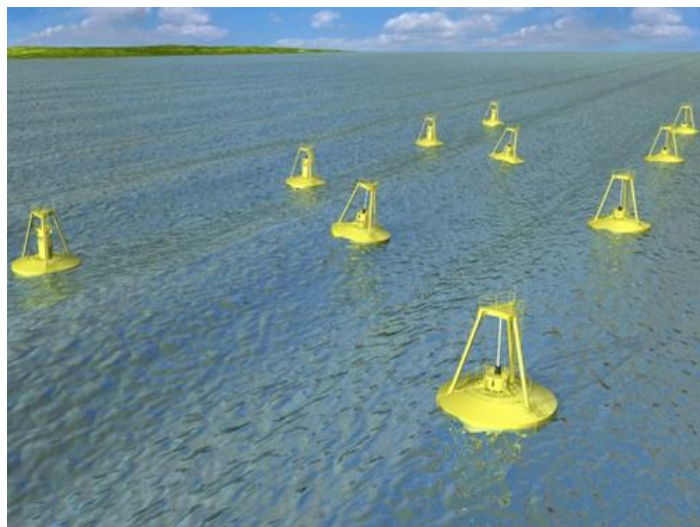


Figura 24 Foto boyas de absorción

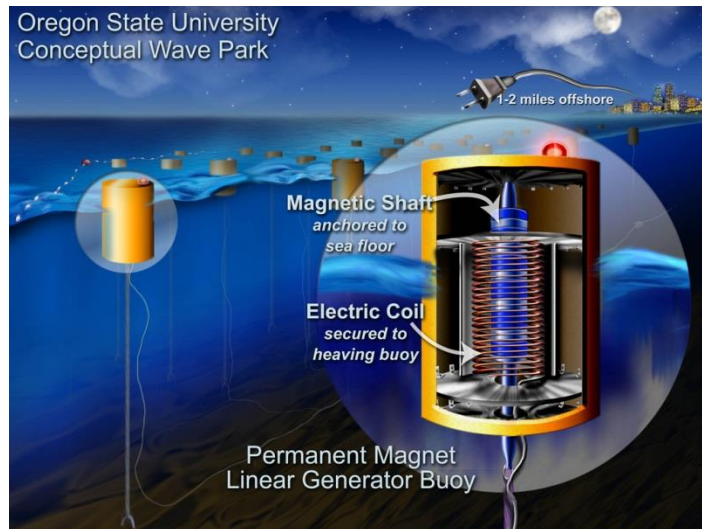


Figura 25 Funcionamiento boyas de absorción

3.2.8.3.3. Atenuadores

Es un conjunto de tubos cilíndricos unidos por bisagras que se colocan perpendiculares a la corriente, como se aprecia en la figura 26.



Figura 26 Atenuadores

El movimiento de las olas provoca una basculación entre cada sección de tubos, mediante un sistema hidráulico se genera electricidad, representado en la figura 27.

OBTENCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE UN ATENUADOR

Vista perfil



Figura 27 Funcionamiento de atenuadores

3.2.8.3.4. Maremotérmica (temperatura oceánica)

Aprovecha la diferencia de temperatura entre la superficie y la profundidad (figura 28). La diferencia de temperatura puede ser de hasta 18°C, lo que produce un rendimiento de apenas el 2%.

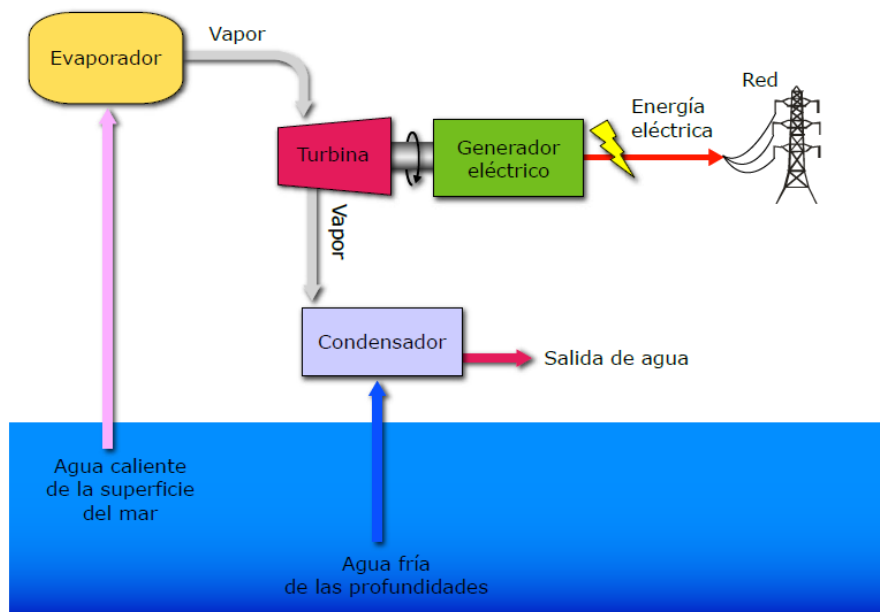


Figura 28 Maremotérmica

2.2.9. Geotérmica

Consiste en el aprovechamiento del calor acumulado en rocas o aguas que se encuentran en el interior de la Tierra, como se puede apreciar en la figura 29.

Según el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), es una fuente de energía abundante y viable.

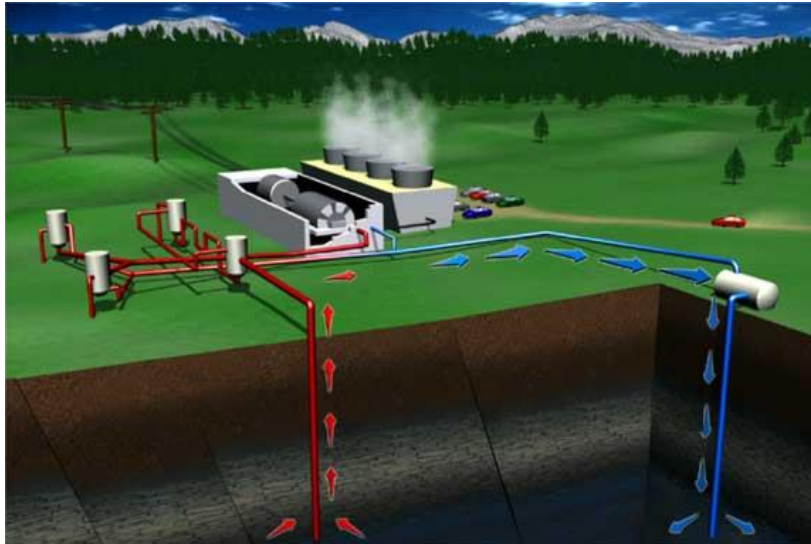


Figura 29 Geotérmica

2.3. Situación actual y futuro de la generación distribuida

En los últimos años el sector energético ha tenido un aumento pero por primera vez en cuatro décadas las emisiones mundiales asociadas con el consumo de energía se mantuvieron estables en 2014. Esto se debe a la concienciación de obtener una mejora en eficiencia energética y en un aumento de las energías renovables, tal y como se puede ver en el informe "Renewables Global Status Report" [3] elaborado por el organismo REN21.

2.3.1. A nivel mundial

Como bien se enumeró en la introducción de este proyecto fin de carrera, el Protocolo de Kioto así como la crisis de combustibles fósiles por la creciente inestabilidad que está aconteciendo en el norte y noreste de África, así como impopularidad de la energía nuclear hace que el futuro de las energías renovables sea cada vez más claro.

Desde 2004 se aprecia un salto considerable en el sector, como bien representa la tabla 9. La inversión se ha multiplicado por 6 en el último año respecto al 2004, lo que ha significado que la capacidad de energía renovable sin contar con hidráulica se haya multiplicado casi por 8.

		INICIO DE 2004 ¹	2013	2014
INVERSIÓN				
Inversión nueva (anual) en energía renovable y combustibles ²	billones de dólares	45	232	270
ENERGÍA				
Capacidad de energía renovable (total, sin incluir hidráulica)	GW	85	560	657

Tabla 9 Datos inversión mundiales

Como se puede apreciar en la figura 30, la capacidad total instalada en 2014 asciende a 657 GW de la cual más del 23% (153GW) está en China, solo en energía eólica tiene más potencia instalada que el segundo país que es EE.UU. con 105 GW. En la figura 30 se representa en un diagrama de barras la potencia instalada de país, pero también se muestra la potencia que hay la Europa de los 28 países (255) y BRICS (Brasil, Rusia, India, China y Suráfrica).

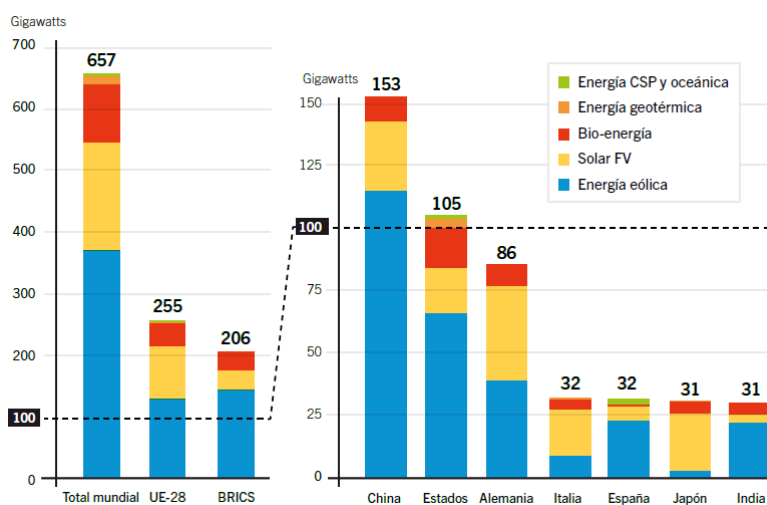


Figura 30 Diagrama barras potencia mundial

La tabla 11 muestra la clasificación teniendo en cuenta la inversión:

	1	2	3	4	5
Inversión en energía y combustibles renovables (sin incluir energía hidráulica mayor a 50 MW)	China	Estados Unidos	Japón	Reino Unido	Alemania
Inversión relativa al PBI anual ¹	Burundi	Kenia	Honduras	Jordania	Uruguay
Capacidad de energía geotérmica	Kenia	Turquía	Indonesia	Filipinas	Italia
Capacidad de energía hidráulica	China	Brasil	Canadá	Turquía	India
Capacidad solar FV	China	Japón	Estados Unidos	Reino Unido	Alemania
Capacidad de energía solar de concentración (CSP)	Estados Unidos	India	—	—	—
Capacidad de energía eólica	China	Alemania	Estados Unidos	Brasil	India
Capacidad de calentamiento solar de agua ²	China	Turquía	Brasil	India	Alemania
Producción de biodiésel	Estados Unidos	Brasil	Alemania	Indonesia	Argentina
Producción de etanol combustible	Estados Unidos	Brasil	China	Canadá	Tailandia

Tabla 10 Clasificación mundial inversión

China una vez más lidera la inversión, con EE.UU, Japón, Reino Unido y Alemania completando los 5 países con mayor inversión en 2014.

Si se representa la inversión desde el 2004 hasta la actualidad, se observa que ha tenido un aumento casi continuo excepto 2012 y 2013, esto es debido a la disminución de inversión en los países desarrollados por la crisis económica.

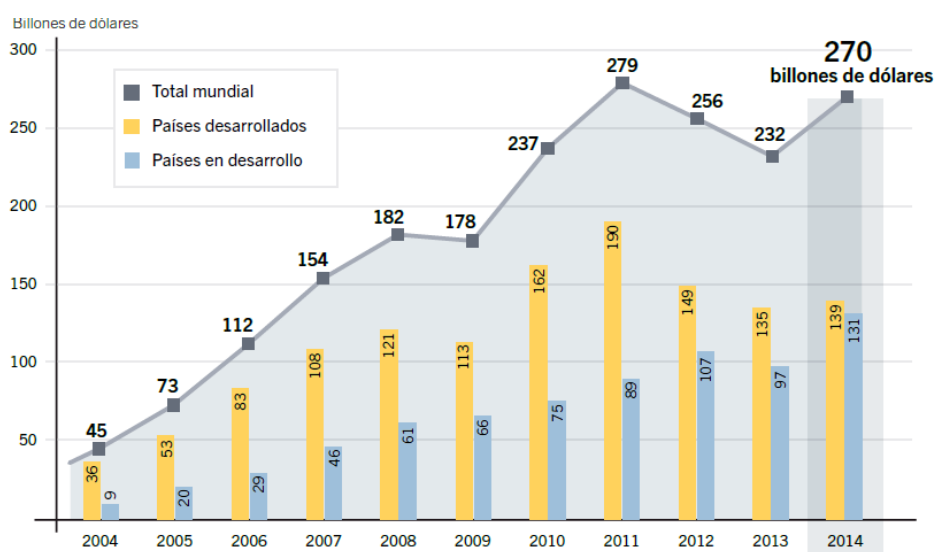


Figura 31 Diagrama inversión mundial

Dicho decrecimiento en la inversión se produjo especialmente en Europa, en 2011 se pasó de 120,7 a 89,6 billones de \$ en 2012, para seguir bajando en 2013 y mantenerse estable en 2014, como se aprecia en la figura 32.

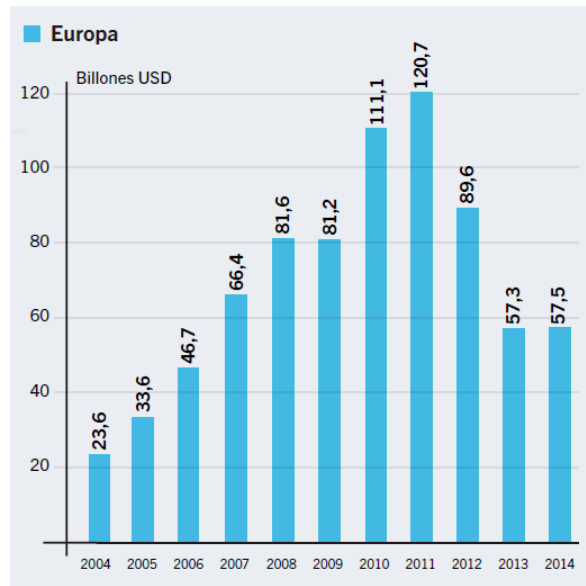


Figura 32 Diagrama inversión Europa

EE.UU. también notó la crisis en su inversión en renovables, como se observa en la figura 33. Se pasó de 50 a 38 billones de \$, pero a diferencia con Europa la crisis en EE.UU. se superó y la inversión se mantuvo estable.

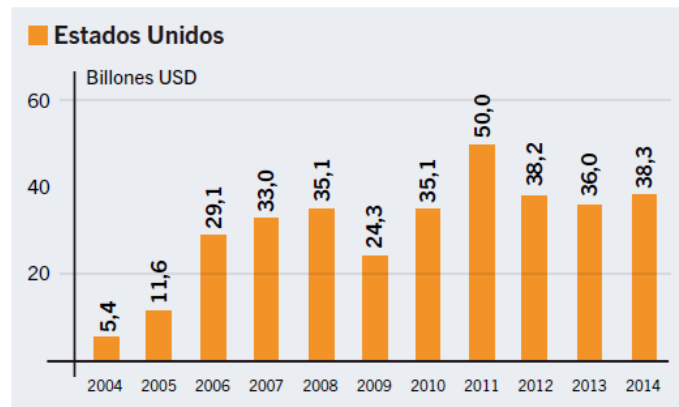


Figura 33 Diagrama inversión EE.UU.

Desde que China fijó la atención en este campo la instalación de energías renovables ha experimentado un gran crecimiento, China un año más sigue liderando con 83.300 millones de dólares en energías limpias aumentando la inversión en más de 20.000 millones de dólares respecto al 2013.

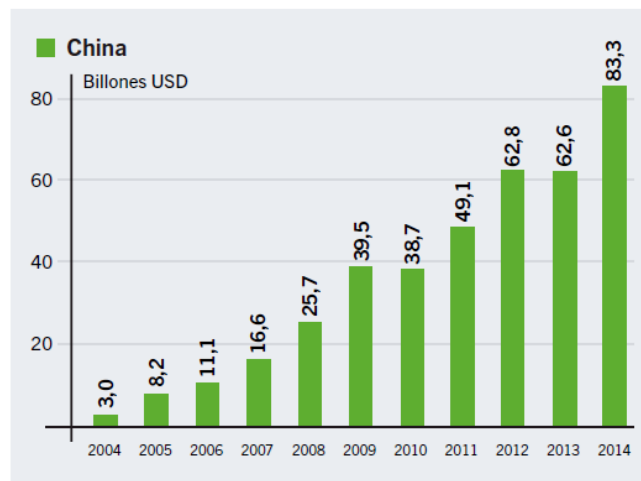


Figura 334 Diagrama inversión China

China será un caso interesante en 2015, ya que por primera vez en los últimos años ha desacelerado su crecimiento y han tenido que devaluar el Yuan varias veces para poder seguir siendo competitivo, esta desaceleración ha provocado incluso que el barril de petróleo baje su precio, ya que China ha disminuido su demanda.

2.3.2. Caso español

Como se ha visto en el anterior apartado, España es una potencia si se habla en generación eléctrica con energía renovable. Sus recursos naturales propician que así sea, se observa el balance energético en España la mayor parte de la energía que consumimos es procedente de energías renovables según datos del Ministerio de Industria, Energía y Turismo (MIET) [4] en 2014 el 39,6%, teniendo una variación respecto al 2013 del 1,3%. Este incremento puede inducir a engaño, ya que prácticamente en casi todas las tecnologías han disminuido excepto en las hidráulicas y en las termoeléctricas. Se ha vuelto a valores de producción eléctrica del 2010 cuando había cerca de un 10% de potencia instalada en energías renovables. Como se puede ver en el gráfico extraído del informe de REE del 2014 en la figura 34.

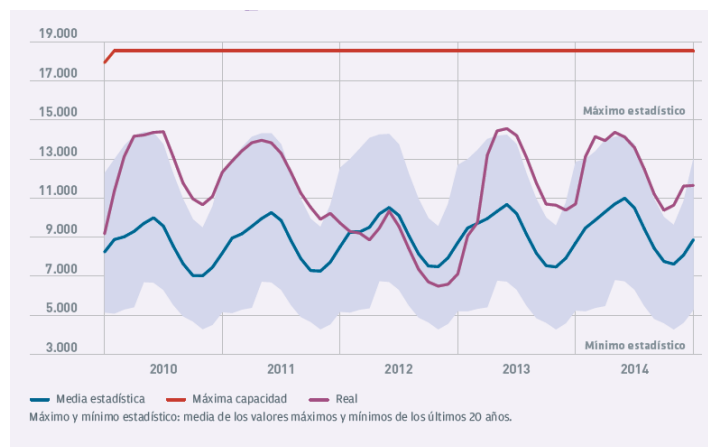


Figura 34 Diagrama potencia hidráulica

La evolución en los últimos años en la potencia instalada de energías renovables se puede ver en la tabla 12

Evolución de la Potencia Eléctrica acumulada (MW)

	Biogas	Biomasa	Energía Marina	Eólica	Hidráulica	Hidroeólica	Instalaciones Mixtas	Residuos	Solar Fotovoltaica	Solar Termo-eléctrica	TOTAL
2000	26	113	0,0	2.281	17.964	0	0	107	11	0	20.503
2001	33	135	0,0	3.272	18.026	0	1	157	13	0	21.637
2002	52	228	0,0	4.882	18.063	0	1	163	17	0	23.406
2003	105	309	0,0	6.180	18.096	0	1	163	24	0	24.880
2004	118	318	0,0	8.181	18.158	0	2	189	37	0	27.002
2005	129	326	0,0	9.944	18.222	0	2	189	62	0	28.874
2006	138	368	0,0	11.693	18.319	0	2	189	167	11	30.888
2007	143	376	0,0	14.818	18.375	0	2	189	733	11	34.647
2008	158	376	0,0	16.646	18.451	0	2	189	3.421	61	39.304
2009	177	502	0,0	19.267	18.505	0	3	189	3.506	282	42.430
2010	192	545	0,0	20.675	18.535	0	3	223	3.960	732	44.863
2011	209	563	0,3	21.529	18.540	0	3	274	4.378	1.149	46.645
2012	218	640	0,3	22.789	18.551	0	19	274	4.665	2.000	49.156
2013	220	657	0,3	22.958	18.801	0	19	274	4.785	2.250	49.965
2014	223	677	0,3	22.975	18.801	12	19	274	4.786	2.250	50.017

Tabla 12 Evolución potencia renovables

La potencia instalada desde el 2000 hasta hoy se ha multiplicado por 2,5. El crecimiento ha sido bastante bueno pero en los últimos años se ha desacelerado hasta llegar al punto que los últimos años la instalación de nuevas unidades de generación es casi nula. Como se puede ver en la tabla 11, la potencia instalada ha pasado de 2.510.866 KW en 2012 a los 51.350 KW en 2014.

Evolución de la Potencia Eléctrica Instalada anualmente (kW)

	Biogas	Biomasa	Energía Marina	Eólica	Hidráulica	Hidroeléctrica	Instalaciones Mixtas	Residuos	Solar Fotovoltaica	Solar Termo-eléctrica	TOTAL
2000	5.006	6.365	0	821.859	42.867	0	66	0	2.265	0	878.428
2001	6.976	22.148	0	990.342	62.204	0	296	50.000	1.867	0	1.133.833
2002	19.268	74.484	0	1.610.156	36.333	0	482	5.760	4.675	0	1.751.158
2003	52.387	40.962	0	1.294.806	33.540	0	271	0	7.285	0	1.429.251
2004	12.745	8.400	0	2.000.685	61.490	0	223	26.000	12.558	0	2.122.101
2005	11.655	8.040	0	1.625.701	63.799	0	218	0	24.922	0	1.734.335
2006	9.175	40.292	0	1.741.543	94.376	0	152	0	105.052	11.000	2.001.590
2007	4.997	0	0	3.124.387	55.931	0	85	0	566.385	0	3.751.785
2008	14.188	672	0	1.828.335	76.273	0	184	0	2.687.164	49.900	4.656.716
2009	19.615	127.499	0	2.612.603	42.618	0	237	0	85.298	221.380	3.109.250
2010	14.630	43.173	0	1.413.773	27.074	0	122	33.600	453.922	449.600	2.435.895
2011	16.822	17.700	296	854.782	4.827	0	173	51.829	418.387	416.700	1.781.516
2012	9.134	76.945	0	1.259.517	10.954	0	16.325	0	286.592	851.400	2.510.866
2013	2.427	17.024	0	169.368	249.973	0	45	0	120.645	249.700	809.182
2014	2.247	20.000	0	16.272	503	11.500	1	0	777	50	51.350

Tabla 11 Evolución variación potencia renovables

Los valores facilitados por el MIET están en KW, por lo que en 2014 solo se ha instalado 51 MW, en la tabla 12, se puede apreciar en cuales tecnologías se ha invertido.

	Biogas	Biomasa	Energía Marina	Eólica	Hidráulica	Hidroeléctrica	Instalaciones Mixtas	Residuos	Solar Fotovoltaica	Solar Termo-eléctrica	TOTAL
Totales	2.247	20.000	0	16.272	503	11.500	1	0	777	50	51.350

Tabla 12 Instalación renovables 2014

Este decrecimiento puede ser debido a las políticas que han tomado el gobierno en las cuales se han dejado de financiar la instalación de energías renovables, esto unido a la propuesta de real decreto sobre el autoconsumo de 18 de julio de 2013. Hace que el mercado eléctrico no sea rentable para pequeños generadores de energía, este tema es ajeno al PFC pero debido a la actualidad se hace una mención.

Por primera vez un sistema eléctrico aislado se ha abastecido únicamente de energías renovables. Sucedió en la isla de Hierro como se puede ver en la figura 35. El acontecimiento sucedió el 09 de agosto de 2015 y la isla estuvo abastecida por energías renovables durante 4 horas. Gracias a la central eléctrica llamada "Gorona del viento" que está compuesta por dos depósitos de agua, un parque eólico, una central hidroeléctrica, una central de bombeo y una central de motores diésel. Durante esas 4 horas como se puede apreciar en la figura 35, las emisiones fueron 0.

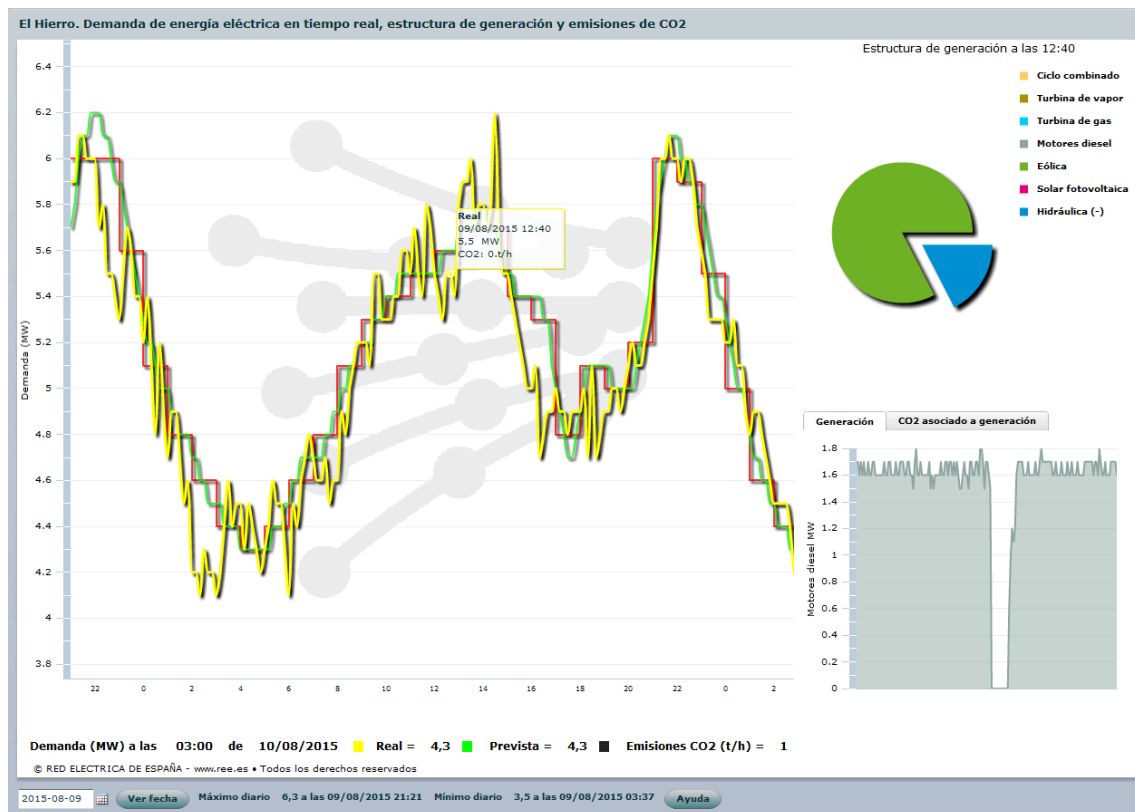


Figura 35 Diagrama generación El Hierro

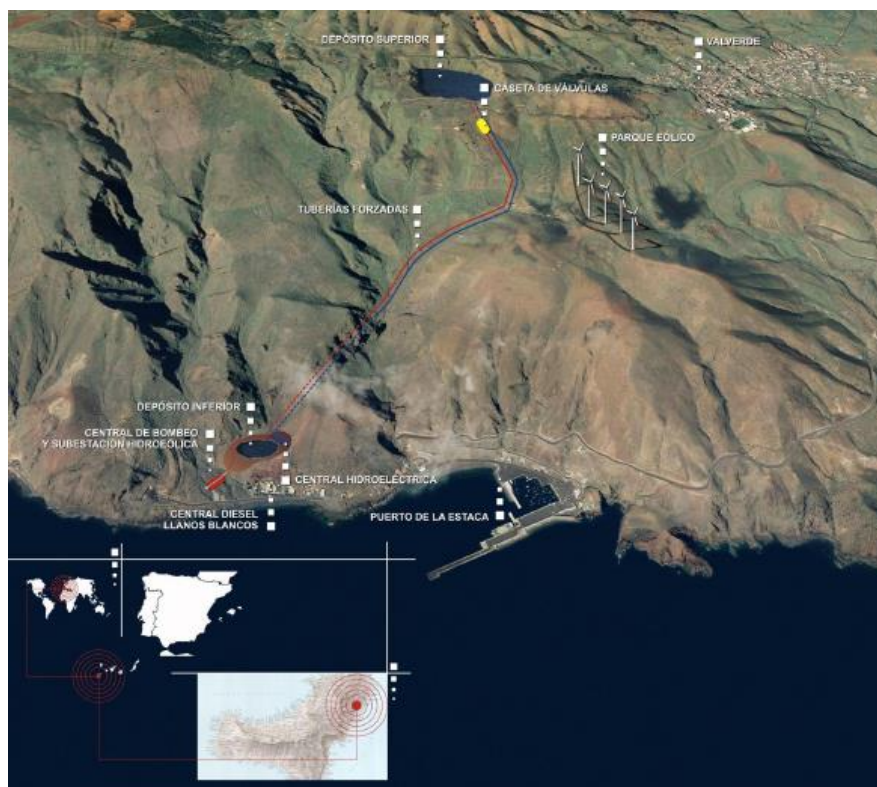


Figura 36 Gorona del viento

3. Técnicas Metaheurísticas

3.1. Introducción

Al ser humano se le ha planteado problemas durante toda su evolución, para solucionarlos ha utilizado ese gran don que nos hace diferente de los animales, la capacidad de utilizar su lógica para intentar resolverlos u obtener una solución que valida. Pues bien estas técnicas es un paso más para poder resolver cuestiones complicadas o de difícil solución, las cuales no pueden ser resueltas con rápidamente.

El término "Metaheurística" fue acuñado por F.Glover en 1986. [5] Deriva de dos palabras de origen griego:

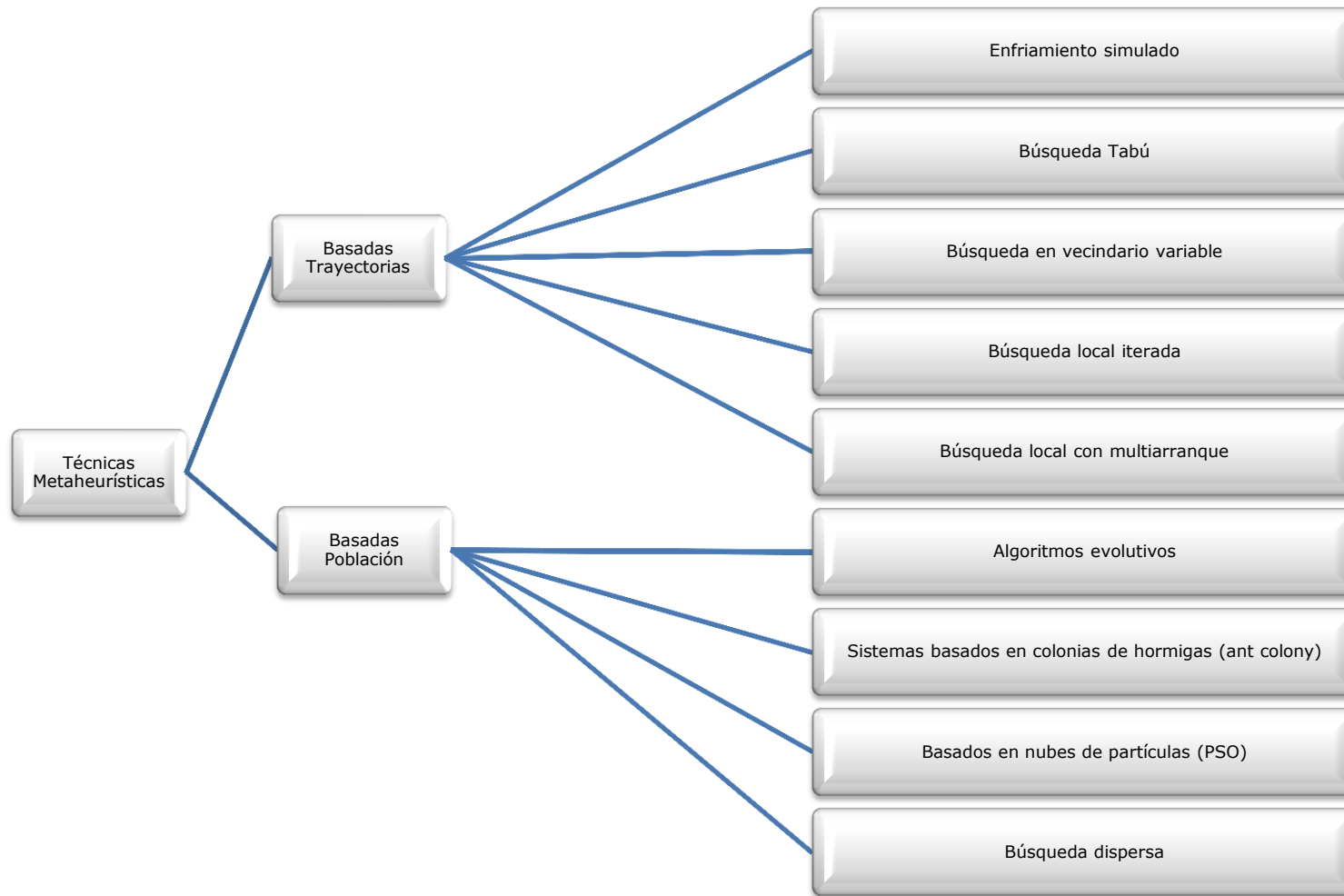
- Meta: significa *más allá de, en un nivel superior*.
- Heurística: Proviene de *heuriskein* y se traduce como *encontrar, descubrir o hallar*. Según la RAE: "*Técnica de la indagación y del descubrimiento*" y "*En algunas ciencias, manera de buscar una solución mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc.*"

Con este término F.Glover pretendía definir un procedimiento que modifica otras heurísticas con el fin de encontrar soluciones más allá del simple óptimo local.

Las técnicas metaheurísticas son algoritmos no exactos, combinan varios métodos heurísticos para realizar una búsqueda más eficaz y eficiente. "*Los procedimientos Metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Los Metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos.*" Pueden ser aplicados en una amplia variedad de problemas, con unos cambios mínimos puede ser adaptado a un problema específico. [6]

Son procesos iterativos que proporcionan buenas soluciones en tiempo y con recursos razonables.

Las técnicas metaheurísticas pueden clasificarse, en las que están basadas en la trayectoria y las que están basadas en la población.



Esquema 1 Tipo Técnicas Metaheurísticas

- Basadas en la trayectoria.
Parten de un punto inicial y se va iterando formando una trayectoria hasta que finaliza la búsqueda con un número máximo de iteraciones o se detecta un estancamiento
- Basadas en población.
Se trabaja con un número de individuos que representan soluciones, una buena solución dependerá de la forma que se manipula la población.

Para entender mejor en que consiste estas técnicas es haremos una serie de definiciones de los conceptos básicos.

- Representación: Determina el tamaño (cardinalidad) del espacio de la búsqueda (SS → search space) de cada problema.
- Objetivo: propósito a alcanzar. Es un predicado matemático que expresa la tarea que se tiene que realizar.
- Función de evaluación: relaciona cada solución factible un valor que determina su calidad.

3.2. **Tipos de Técnicas Metaheurísticas**

3.2.1. Basadas en la trayectoria

Denominadas así porque el proceso de búsqueda que desarrollan estos métodos se caracterizan por una trayectoria en el espacio de soluciones. Parten de una solución inicial generando una trayectoria o camino a través de operaciones de movimiento.

3.2.1.1. Enfriamiento simulado (ES) [Simulated Annealing (SA)]

Se trata de una de las técnicas metaheurísticas más antiguas, en 1983 Kirkpatrick, Gellat y Vecchi [7] la idearon desde un punto de vista matemático. Simula el proceso de recocido de los metales y del cristal. Se calcula una solución mediante iteraciones, la ventaja que tiene respecto a algoritmos tradicionales es que la búsqueda no finalice en óptimos locales, para ello se permite que algunos movimientos sean hacia soluciones peores pero asignándole una determinada probabilidad.

Se utilizan algoritmos de Metrópolis basados en las trabajo de Metrópolis (1953) [8] en el campo de la termodinámica estadística. Este modeló el proceso de enfriamiento simulando los cambios energéticos de un sistema de partículas según se disminuye la temperatura hasta que tiene un estado estable (congelado). Se puede expresar:

$$P(\delta E) = e^{-\delta E/kT}$$

Siendo:

- $\delta E \rightarrow$ incremento de energía
- $k \rightarrow$ constante de Boltzmann $\left(k \approx 1,3806204 \cdot 10^{-23} J/K\right)$
- $T \rightarrow$ temperatura

El proceso de enfriamiento comienza con una temperatura muy elevada (T_0) y se va reduciendo en cada iteración hasta llegar a una temperatura final (T_f) o estado fundamental. En dicha disminución de la temperatura se obtienen variaciones de energía, si la energía es menor que el estado actual, entonces se acepta el estado calculado sustituyendo al estado actual. Por el contrario, si el estado generado provoca un incremento de energía, tendrá una probabilidad de ser aceptado dada por $e^{-\delta E/T}$. Lo que significa que aceptará estados a temperaturas elevadas (principio iteración) mientras que no las aceptará a temperaturas bajas (fin de la iteración).

Para poder aplicar el algorítmico de Metrópolis a la metaheurística se hace una analogía.

Termodinámica	Optimización
Configuración cristalina	Solución factible
Configuración cristalina de mínima energía	Solución óptima
Energía de la configuración	Coste de la solución
Temperatura	Parámetro de control

Tabla 13 Comparativa Enfriamiento Simulado

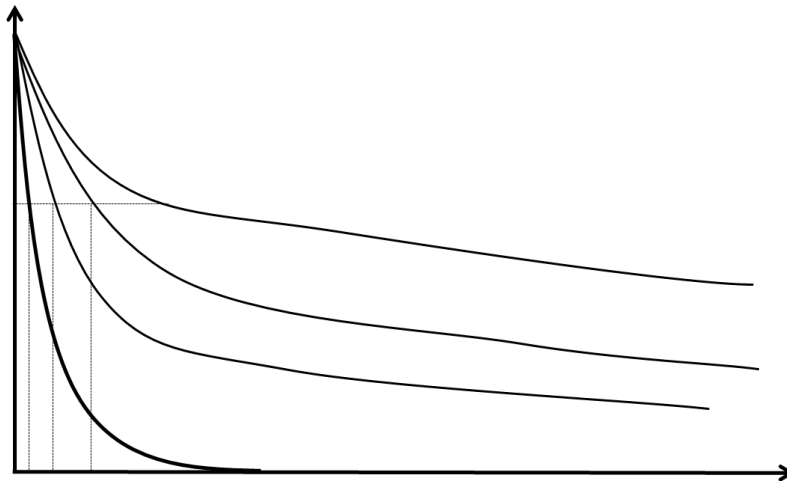


Figura 37 Diagrama Enfriamiento Simulado

Si se analiza el enfriamiento simulado desde un punto de vista algorítmico, se trata de una búsqueda local que introduce una fase de aleatorización en la aceptación de movimientos, es decir que si el movimiento es de mejora se acepta pero si es una solución peor se acepta con una cierta probabilidad.

En optimización la constante de Boltzmann no tiene aplicación útil por lo que no se considera. La aceptación de movimientos viene dada por el parámetro T (temperatura), este permite que en los primeros instantes de búsqueda la mayoría de los movimientos se acepten, aunque éstos empeoren. Mientras según disminuye la temperatura hace que el proceso sea más restrictivo.

3.2.1.2. Búsqueda Tabú

Desarrollada por Fred Glover en 1986 [9], es una de las técnicas más utilizadas en problemas de optimización. Se basa en la utilización de una memoria de búsqueda, esto permite realizar una estrategia de análisis y explotación de regiones del espacio de búsqueda. En cada iteración se elige la mejor solución y es añadida a una lista llamada "Lista Tabú", en ella se encuentra un determinado número de resultados recientes, los cuales no se pueden repetir en un determinado tiempo. Lo que permite que no se produzcan óptimos locales de una manera sistemática y no aleatoria. Se puede resumir en:

Es mejor una mala decisión basada en información, que una buena decisión tomada al azar. En un sistema que emplea memoria, una mala decisión basada en una estrategia proporcionará claves útiles para continuar la búsqueda. En cambio, una buena decisión fruto del azar no proporcionará ninguna información para posteriores acciones. [10][11]

La búsqueda empieza con una solución inicial factible (x), definiremos una vecindad $N(x)$ de esa solución, de modo que intentaremos alcanzar una mejor solución efectuando operaciones de movimiento, se aprecia en la figura 38.

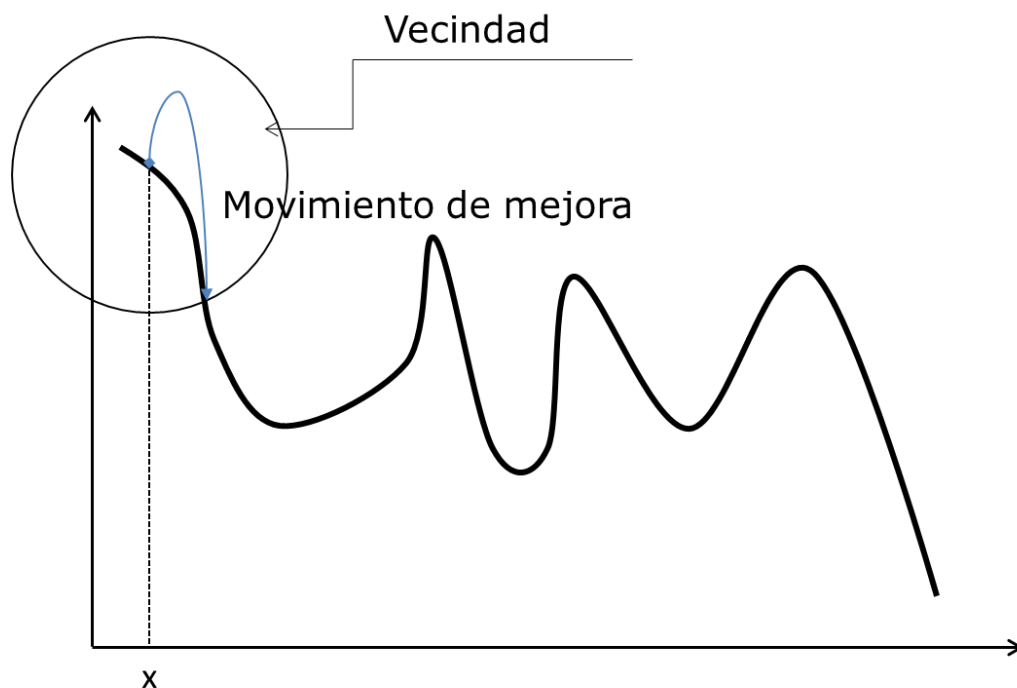


Figura 38 Diagrama Búsqueda Tabú

Con el siguiente movimiento se encuentra una solución mejor a la inicial, con este movimiento se crea ya una región prohibida (coloreada), esto hace que se evite el volver hacia atrás (figura 39).

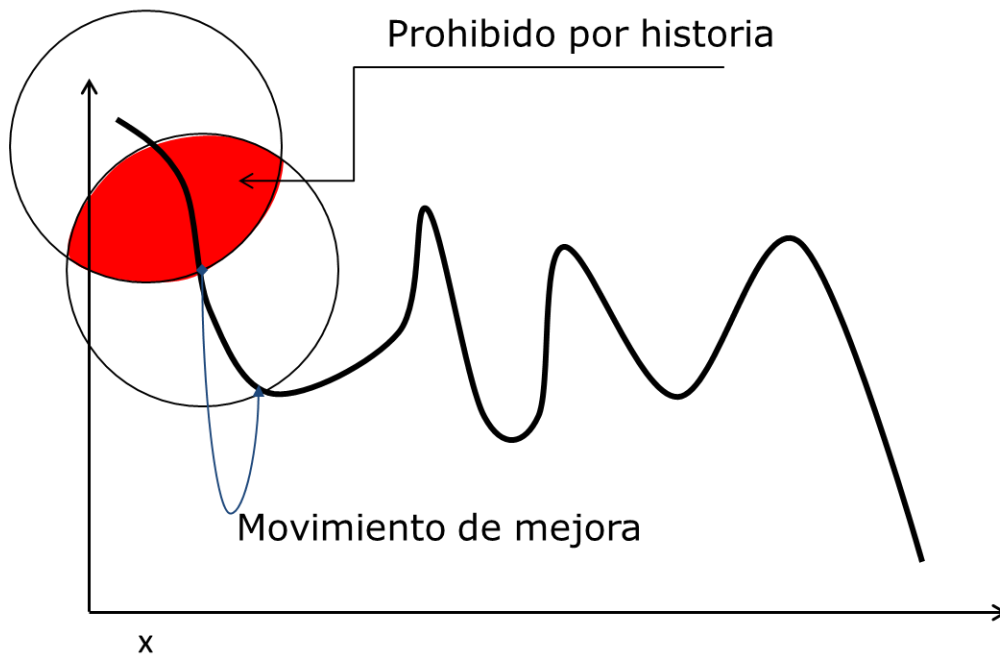


Figura 39 Diagrama Búsqueda Tabú

Con el siguiente movimiento, la decisión es más restrictiva ya que la región prohibida es mayor y la solución es peor (figura 40)

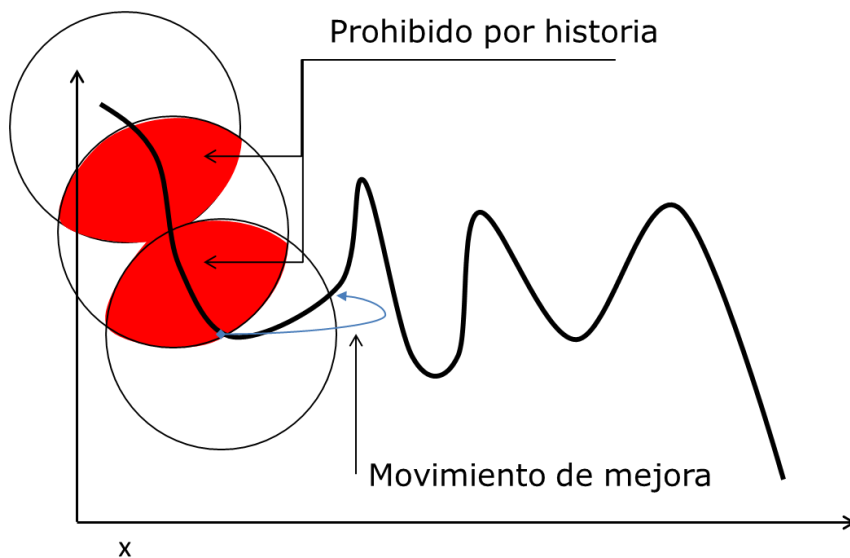


Figura 40 Diagrama Búsqueda Tabú

En este método hay dos términos importantes: la intensificación y la diversificación, la primera consiste en explorar áreas del espacio de soluciones, en las que podría estar el óptimo global. Mientras que la diversificación promueve la explotación de regiones que han sido

usadas poco en el proceso, lo que consigue que no se centre la búsqueda en regiones locales.

Si se compara con el enfriamiento simulado, es más sencillo de utilizar debido al menor número de parámetros, pero con los términos intensificación y diversificación hace que el método adquiera una mayor complejidad.

3.2.1.3. Búsqueda en vecindario variable (VNS → Variable Neighborhood Search)

Ideada en 2002 por Hansen y Mladenovic [12], se basa en un conjunto de vecindarios, estos son definidos al principio del proceso. Consiste en ir soluciones para los distintos vecindarios, si la solución es mejor que la anterior la sustituirá hasta alcanzar el óptimo.

Se debe conseguir la diversificación adecuada para que se pueda encontrar un solución mejor que la calculada hasta el momento, si la intensificación es alta hará que el proceso se alargue.

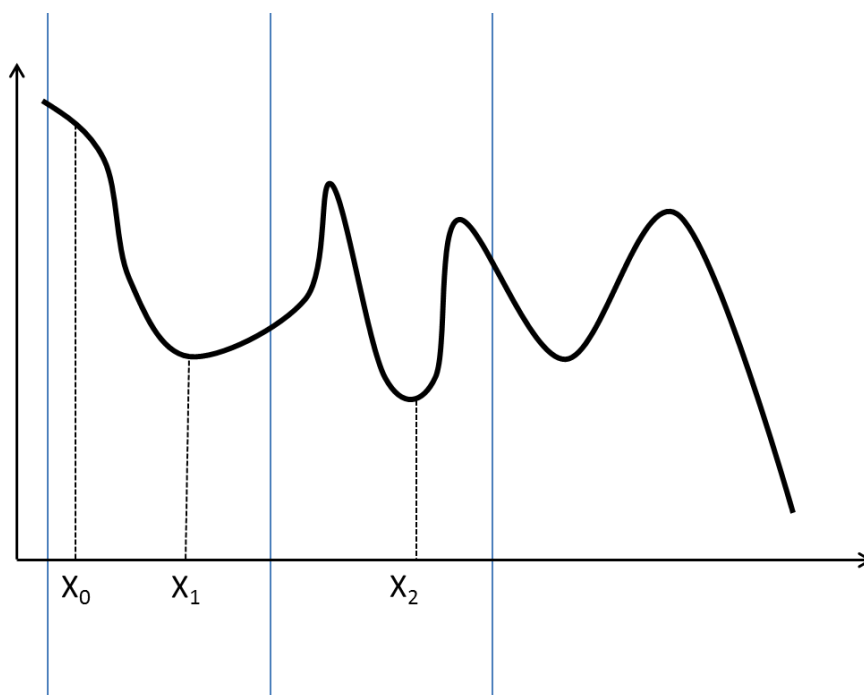


Figura 41 Diagrama Búsqueda Vecindario

Como se aprecia en la figura 41, x_1 sería un óptimo local de la primera vecindad pero como podemos ver no sería global, mientras que x_2 sería un óptimo local y global.

3.2.1.4. Búsqueda Local Iterada

Ideada por Lourenço, Martin y Stützle en 2003 [13], en este método lo que se intenta es explorar los óptimos de caso estudiado, para ello se comienza con una solución inicial aleatoria que se optimiza a una solución más ideal, se continua calculando soluciones y se añade una perturbación que hará que se calcule nuevos óptimos. Esta perturbación debe ser adecuada, si es demasiado leve hará que el óptimo que se calcule sea el mismo del que se parte, mientras que si es demasiado intenso hará el método se convierta en una búsqueda con Multiarranque Aleatorio (explicado en el punto 4.2.1.5).

La clave de que el método sea efectivo es el valor de la perturbación, tal y como indica los autores del método *"Una buena perturbación transforma una excelente solución punto de partida para una técnica de Búsqueda"*

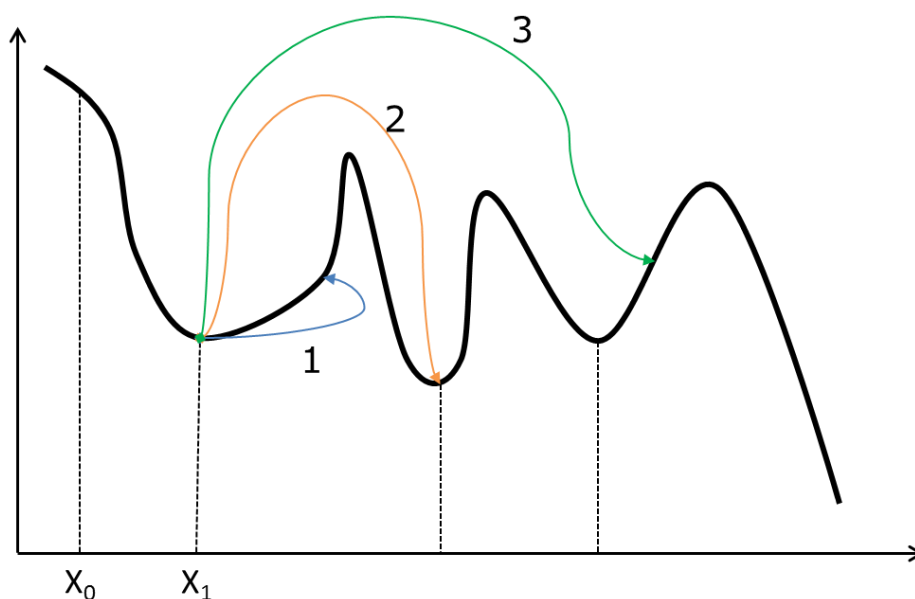


Figura 42 Búsqueda local iterada

Como se observa en la figura 42, si se parte de un óptimo local x_1 , el resultado dependerá de la perturbación escogida:

1. En este caso la perturbación es demasiado pequeña por lo que el óptimo al que llegaremos será del que salimos
2. En este caso la perturbación es óptima, ya que el nuevo óptimo local es mejor que el inicial.
3. En este caso si bien se obtiene un nuevo óptimo local hace que la perturbación se considere aleatoria ya que ha sido demasiado grande.

3.2.1.5. Búsqueda Local con Multiarranque

Ideada en 1982 por Boender, Rinnooy-Kan, Stougie, Timmer. Su desarrollo es simple, se generan soluciones de manera aleatoria en el espacio de búsqueda y se aplica la búsqueda de óptimos locales, entre estos el mejor se considera el óptimo global.

3.2.2. Basadas en población

Son técnicas que emplean un conjunto de soluciones (población) en cada iteración del algoritmo, mientras que las metaheurísticas basadas en la trayectoria utilizan una única solución.

3.2.2.1. Algoritmos evolutivos

Las primeras publicaciones que se utilizaban los algoritmos evolutivos (Evolutionary Algorithms -EA) datan de los cincuenta, donde se usaron para resolver sencillos problemas combinatorios.

La idea se basa en el principio de supervivencia de la naturaleza (neo-darwiniana). Los individuos que tienen una mejor adaptación al medio tienen una mayor probabilidad de vivir más tiempo, con lo que tendrán más posibilidades de generar descendencia para heredar sus buenas características.

Desde el punto de vista algorítmico, hay que entender que se entiende por:

- Población→ Conjunto de soluciones candidatas en un problema dado, cada una de ellas recibe el nombre de individuo
- Selección→Elección de individuos de manera que sean escogidos los mejores que transmitan su contenido genético a su descendencia.
- Alteración→Método que genera nuevos individuos a partir de los antiguos. Dependiendo del número de individuos antiguos que se utilizan para generar uno nuevo, la transformación se denomina mutación, si a partir de un individuo antiguo se genera uno nuevo, o cruce si un individuo nuevo es combinación de dos individuos antiguos.

Existen distintos métodos de Algoritmos evolutivos:

- Programación Evolutiva: Habitualmente no tiene cruce, por lo que el mecanismo de evolución es la mutación, se selecciona una población (padres) que mutan en nuevos individuos (hijos). De la población de padres e hijos se seleccionan de manera que el mejor individuo sobreviva, esta estrategia se denomina "elitismo"
- Estrategias de Evolución: Se evalúa y selecciona de la población los padres de forma uniforme y aleatoria. La combinación de dos padres genera los hijos de manera que $n^{\circ} \text{ hijos} > n^{\circ} \text{ padres}$. Los hijos son modificados por la mutación y la supervivencia es determinista y puede estar implementada con o sin elitismo.
- Algoritmos Genéticos: La principal diferencia de este método es el concepto de recombinación de soluciones, esto es debido a los mecanismos genéticos neo-darwinistas (selección, cruce y mutación). Otra diferencia es la distinción que se hace entre la representación del problema (genotipo) y las variables del problema (fenotipo). Para entender la diferencia entre ambos utilizaremos un símil biológico de una enfermedad genética. Imaginemos dos individuos que no tienen dicha enfermedad, tienen un hijo que sí que la tiene, esto es debido a que los padres tenían el gen de la enfermedad y el hijo la ha desarrollado. Es decir los padres y el hijo tienen el mismo genotipo (genes portadores de la enfermedad) pero distinto fenotipo (hijo tiene enfermedad pero los padres no).

Para poder resolver un problema hay que definir una serie de elementos:

- Población inicial: generada de manera aleatoria, en caso de que no sea aleatoria hay tener especial cuidado en que tenga la suficiente diversidad como para tener la mayor parte de la población con el fin de evitar una convergencia prematura.
- Representación: correspondencia entre soluciones factibles (fenotipo) y la codificación de las variables (genotipo).
- Función de evaluación: determina la calidad de los individuos de la población.
- Operadores genéticos: métodos por el que se obtienen nuevos individuos, suelen ser dependientes de la representación. Utiliza el cruce (sustituye los genes de un padre por los genes de otro padre para generar un nuevo individuo hijo) y mutación (cambio aleatorio de parte de un individuo, se utiliza para preservar la diversidad de las soluciones).
- Selección: mecanismo que permite elegir a los individuos con un mayor valor en función de la evaluación.

La cantidad de variantes en los algoritmos genéticos es enorme, por lo que se ha hecho unas definiciones básicas de las características. No es el fin de este proyecto fin de carrera aplicar el método pero si entenderlo.

- Algoritmos meméticos: El término "meme" fue introducido por R.Dawkins [14] para dar un explicación a la evolución cultural. Su principio es: "De la misma forma que en una población se transmiten los genes de los padres a los hijos, los memes se transmiten de cerebro a cerebro de la población." Es común considerar que los algoritmos meméticos son algoritmos genéticos que se añade un procedimiento de Búsqueda Local. Si bien tienen parte en común, los algoritmos meméticos introducen características que lo hacen diferente, por ejemplo los algoritmos meméticos introducen todo el conocimiento del problema que se tenga disponible, por el contrario los algoritmos genéticos intentan evitar las particularidades del problema

Los individuos representan soluciones al problema planteado, de todos los individuos únicamente deben sobrevivir los mejores

(elitismo), el algoritmo decide cuales pero exclusivamente de descendientes, esto se hace mediante el esquema generacional. También se puede dar el caso de que individuos de la población actual pasen a la siguiente población, esto significa que el esquema es estacionario.

El mayor problema que tiene este método es que se produzca una convergencia prematura, esto es debido a la baja diversidad de la población seleccionada, casi todos los individuos se encuentran en una región del espacio de búsqueda.

3.2.2.2. Algoritmos basados en Colonias de Hormigas

Como su propio nombre indica, este método está basado en el comportamiento de colonias de hormigas. Estas son insectos sociales, es decir son capaces de asociarse a otros individuos para resolver tareas complejas y que una hormiga como individuo no podría.

Ideado por Dorigo, Maniezzo y Colorni en 1996[15], el método se fija como las hormigas son capaces de conseguir comida, en un principio exploran el área cercana al hormiguero de una manera aleatoria. Si una hormiga encuentra comida la lleva al hormiguero, en su camino va depositando una sustancia llamada feromona, esta guía al resto de hormigas hacia la comida. Si existe más de un rastro, la elección de cual seguir se toma por la cantidad de feromona que tiene cada uno, si es más intenso puede ser que sea más reciente o que ha sido transitado por más hormigas, esto quiere decir que más hormigas han vuelto desde ese rastro con comida. Pues bien, el método se basa en una colonia de hormigas artificiales y se comunican por una feromona artificial (Dorigo y Stützle, 2004). Cada hormiga artificial es analizada tanto el recorrido como posiciones en el problema a solucionar, obteniendo así una posible solución. Las soluciones más repetidas o lo que es lo mismo con más cantidad de feromonas artificiales, será la óptima.

Algunas de las ventajas de este método son:

- La componente estocástica permite que las hormigas construyan gran cantidad de soluciones.
- Se exploran muchas más soluciones que otros métodos.

- La información heurística (decisión de una hormiga) guía a las hormigas hacia soluciones mejores.
- La experiencia de las hormigas se puede utilizar para construir mejores soluciones en iteraciones futuras.

En el planteamiento del problema es vital que la definición de los rastros de feromonas sea correcta, si no fuese así las soluciones calculadas podrían tener una calidad baja. Dorigo defendía que el criterio de depósito de feromonas es crítico, un ejemplo podría ser depositar una cantidad inversamente proporcional a la calidad de la solución. Otro problema es cuando debido al criterio de depósito la solución no es óptima por una convergencia demasiado rápida, esto se puede solucionar por medio de la evaporación del rastro de feromonas. Esta técnica suele estar descrita de manera exponencial, de forma que la evaporación será mayor al principio.

Como todas las técnicas metaheurísticas es importante la diversificación y la intensificación en la búsqueda. Esto se hace a través de la gestión del rastro de feromonas, este rastro describe una función de distribución de probabilidad sobre el espacio de búsqueda, determinando el subconjunto donde intensificar.

3.2.2.3. Algoritmos basados en Nubes de Partículas

Si en el caso anterior los individuos eran hormigas, en este caso son aves o peces cuando se desplazan en bandadas. Se elige estos individuos por su sincronía y estética cuando se desplazan en grupo, en este desplazamiento se dispersan, se reagrupan y cambian de dirección repentinamente. Cada individuo realiza una trayectoria que establece una posición en el grupo, esto es por el beneficio que obtiene el individuo por estar en dicho grupo, se beneficia de la experiencia de otros individuos a la hora de sobrevivir (búsqueda de comida, evitar depredadores, etc...).

Como se entiende se trata de una técnica basada en la naturaleza que se desarrolló en EE.UU. por Kennedy y Eberthart en 1995. Cada individuo es estudiado y puede cambiar su opinión por: conocimiento del entorno (adaptación), experiencias del individuo (memoria individuo) o por las experiencias del resto de individuos (memoria vecindario). Con el paso del tiempo, las opiniones de la

mayoría de los individuos será bastante similar, esto significa que tenderán a encontrar una solución óptima o la mejor encontrada.

Una característica muy relevante es que no se crean nuevos individuos, es decir en este método no hay ni mutaciones ni cruzamientos.

3.3. Evolución de las técnicas metaheurísticas

Los algoritmos metaheurísticos han ido evolucionando, a finales del siglo XX los autores E. Zitzler y L. Thiele publicaron el artículo "*Multi-objective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach*" [36] donde se compara técnicas que en lugar de optimar un único objetivo lo hace con varios, lo que se llama multi-objetivo, lo que significa que en un mismo proceso se pueden obtener varias soluciones. Otros artículos donde se describen métodos metaheurísticos multi-objetivo son [33] [34] [35]. En ellos se habla de técnicas como Multi-objective Tabu Search (MOTS), Multi-objective Evolutionary Particle Swarm Optimization (MEPSO), Multi-objective Evolutionary Algorithm (MOEA), etc...

La evolución de técnicas ha hecho aparecer muchos métodos que se puede ubicar dentro de la clasificación desarrollada dentro de este capítulo, ya sean algoritmos de evoluciones genéticas como:

- Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) [41]
- Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2) [42]

Si se habla de evoluciones en los métodos poblacionales, el estudio de las abejas ha hecho la aparición de varios como:

- Artificial Bee Colony Algorithm (ABC) [43] [44], la población a estudiar son tres tipos de abejas (exploradoras, observadoras y empleadas) y su ritual para la búsqueda de comida.
- Honey bee Mating Optimization (HBMO) [45], se estudia la población de abejas y su ritual de apareamiento.

Otro método a destacar es Harmony Search Algorithm (HSA) [46] [28], este método se puede clasificar dentro del estudio de poblaciones. Se basa en la búsqueda de la armonía de un grupo de músicos.

4. Optimización de redes eléctricas con generación distribuida

4.1. Introducción

En este apartado se va a analizar una serie de artículos que son fruto de estudios científicos, con ello se verá la posibilidad de optimizar un sistema de distribución eléctrica con elementos de generación distribuida aplicando métodos de optimización basadas en técnicas metaheurísticas. Los artículos seleccionados optimizan diferentes aspectos y utilizan diferentes técnicas.

4.2. Objetivos

El autor decide que va a optimizar y como, para ello lo argumenta enumerando los motivos que le han llevado a realizar los estudios. La elección más importante es la función objetivo, ya que los resultados sean útiles depende de la correcta elección.

Los objetivos más comunes son:

- Ubicación y dimensionamiento de las fuentes de GD en un sistema de nodos, normalmente se utilizan modelos sugeridos, es común que se emplee modelos IEEE, aunque en algunos casos se estudia modelos reales.
- Optimización de costes, analizan la inversión económica que hay que afrontar y la contrastan con el ahorro que consiguen.
- Minimización de pérdidas y variaciones de tensión, de tal forma que el sistema estudiado sea lo más rentable energéticamente y las condiciones de trabajo sean correctas.
- Estabilidad y fiabilidad del sistema de potencia. Se parte de un modelo y se somete a una serie de pruebas, esto se realiza mediante el planteamiento de escenarios.

4.3. Restricciones de optimización en un sistema con generación distribuida

En todo sistema de potencia hay una serie de restricciones en su optimización, como el fin de este PFC es el análisis de sistemas de potencia con GD, habrá restricciones propias de su naturaleza (climatológicas) y genéricas ($P_{generada}=P_{consumida}$, estructurales, etc...).

Las condiciones de trabajo de un sistema de potencia están determinadas por la UCPTE (Unión para la Coordinación de la Producción y el Transporte de Electricidad), según se puede apreciar en el BOE en el P.O.-1.1 *Criterios de funcionamiento y seguridad para la operación del sistema eléctrico*, en el apartado 4.3 *Márgenes de variación admisibles de los parámetros de control en la operación*. [13]

4.3.1. Límites de tensión en barras

La magnitud de la tensión en las barras del sistema de distribución tiene un rango de trabajo, lo que quiere decir que hay un límite máximo y un límite mínimo

$$|V_n|_{min} \leq |V_n| \leq |V_n|_{max} \quad (1)$$

Siendo;

$V_{n \min}$: límite mínimo de la magnitud de la tensión en la barra n

$V_{n \max}$: límite máximo de la magnitud de la tensión en la barra n

4.3.2. Límites de potencia a través de la subestación

Son las limitaciones estructurales impuestas por la capacidad de los elementos que tiene un sistema eléctrico: conductores, equipos de transformación, equipos de transformación, etc...) Estas determinan el flujo de cargas de un sistema.

$$|P_n|_{min} \leq |P_n| \leq |P_n|_{max} \quad (2)$$

Siendo;

$P_{n \min}$: potencia mínima capaz de ser entregada a través de la subestación

$P_{n \max}$: potencia máxima capaz de ser entregada a través de la subestación

4.3.3. Pérdidas en la línea

En un sistema de generación centralizada, las pérdidas producidas en la línea de transporte son muy importantes,

$$P_{p\acute{e}rdida\ línea} = Z_{línea} \frac{(P_l^2 + Q_l^2)}{V_l^2} \quad (3)$$

Donde;

$Z_{línea}$: impedancia de la línea

4.3.4. Límites de flujo de potencia

La introducción de GD en la red de distribución puede dar lugar a flujos de potencia en ambas direcciones, por tanto, se tienen en cuenta los límites de las líneas

$$S_n \leq S_{n,max} \quad (4)$$

Siendo;

$S_{n\ max}$: límite máximo del flujo de potencia en la línea .

4.3.5. Potencia suministrada por aerogenerador

Como es de suponer la potencia estará ligada a la velocidad del viento.

$$P_{aerogenerador} = \begin{cases} v^3 \cdot a - P_n \cdot b \rightarrow v_{ci} < v < v_r \\ P_n \rightarrow v_r < v < v_{co} \\ 0 \rightarrow \text{Demás casos} \end{cases} \quad (5)$$

$$Siendo = \begin{cases} v \rightarrow \text{velocidad del viento} \\ a = \frac{P_n}{(v_r^3 - v_{ci}^3)} \\ b = \frac{v_{ci}^3}{(v_r^3 - v_{ci}^3)} \\ P_n \rightarrow \text{potencia nominal} \\ v_{ci} \rightarrow \text{velocidad mínima} \\ v_r \rightarrow \text{velocidad nominal} \\ v_{co} \rightarrow \text{velocidad máxima} \end{cases}$$

4.3.6. Potencia suministrada por unidad fotovoltaica

La potencia estará condicionada por la radiación solar que reciba y por la temperatura.

$$P_{PV} = P_{m\acute{a}x} \frac{G}{G_{m\acute{a}x}} \cdot (1 + k \cdot \Delta T) \quad (6)$$

Siendo $\begin{cases} G \rightarrow \text{radiación solar} \\ k \rightarrow \text{rendimiento dependiendo de la temperatura} \end{cases}$

4.4. Aplicaciones de técnicas metaheurísticas

Para el desarrollo de este apartado, se han elegido una serie de artículos científicos que tratan el tema, teniendo en cuenta: resultados, técnicas elegidas, escenarios planteados, etc...

4.4.1. Artículos

4.4.1.1. Optimal Location and Sizing of Distributed Generators in Distribution Networks. [16]

- Objetivo

Se optimiza el sistema colocando una unidad de GD, sin tener en cuenta que tipo de tecnología usa.

- Modelo a optimizar

El sistema es radial de 69 nodos presentado por IEEE como se aprecia en la figura 43, con una carga de 3,8 MW, 2,69 MVAR y un factor de potencia de 0,82 inductivo.

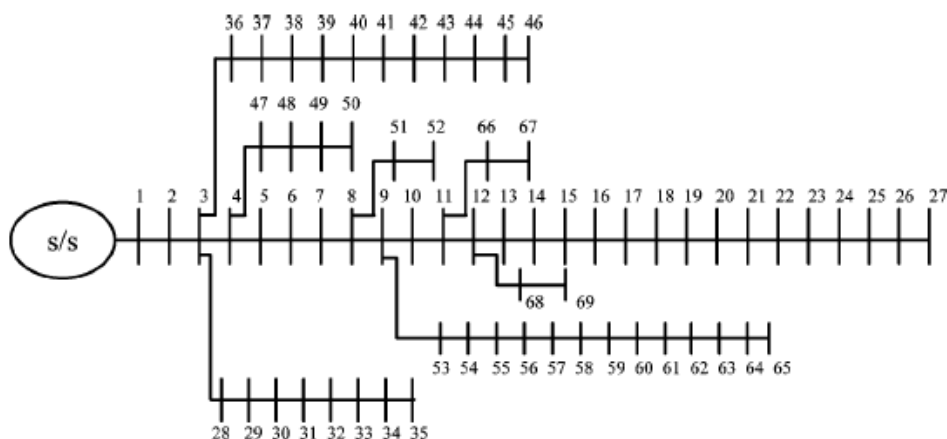


Figura 43 IEEE 69 bus

- Función objetivo y técnica empleada

Para optimizar la ubicación de la unidad de GD, el autor utiliza como función objetivo el dimensionamiento de dicha unidad y las pérdidas totales en el sistema. Esto lo hace ubicando la GD en cada nodo y calculando el resultado. Teniendo como condiciones que la tensión este dentro de $\pm 5\%$ y que el flujo de cargas se cumpla.

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (7)$$

$$P_{DGi} = \frac{\alpha_{ii}(P_{DGi} + x Q_{Di}) + \beta_{ii}(x P_{DGi} + x Q_{Di}) - X_i - x Y_i}{x^2 \alpha_{ii} + \alpha_{ii}} \quad (8)$$

$$\text{Siendo} \left\{ \begin{array}{l} P_L \rightarrow \text{Potencia perdida} \\ P_{DGi} \rightarrow \text{Potencia proporcionada por GD} \\ P_{Di} \rightarrow \text{Carga real demandada por el nodo} \\ x \rightarrow tg(\cos^{-1} fdp_{DG}) \\ Q_{Di} \rightarrow \text{Carga reactiva demandada por el nodo} \\ X_i \rightarrow \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} P_j - \beta_{ij} Q_j) \\ Y_i \rightarrow \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} Q_j - \beta_{ij} P_j) \\ \alpha_{ij} \rightarrow \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \\ \beta_{ij} \rightarrow \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \sen(\delta_i - \delta_j) \end{array} \right.$$

El método de optimización es la técnica metaheurística de nubes de partículas (PSO), para determinar si los resultados son de buena o mala calidad, utiliza otra técnica llamada *método de mejora analítica* (IA - Improved Analytical Method). Así el autor puede comparar las soluciones y concretar la calidad de los resultados.

Cuando optimiza con nubes de partículas (PSO) la optimización de ambas ecuaciones se hace de manera simultánea, mientras que con el método analítico, primero optimiza el dimensionamiento y luego las pérdidas.

- Resultados y conclusiones

Los resultados son calculados mediante una combinación de PSO y con el método Newton-Raphson, la herramienta que utiliza es MATLAB.

El autor calcula el dimensionamiento de la unidad de GD y las pérdidas totales utilizando las técnicas de optimización, esto lo hace para todos los nodos. Como se puede ver en la figura 44, la ubicación óptima será el de menor valor y se encuentra en el nodo 61.

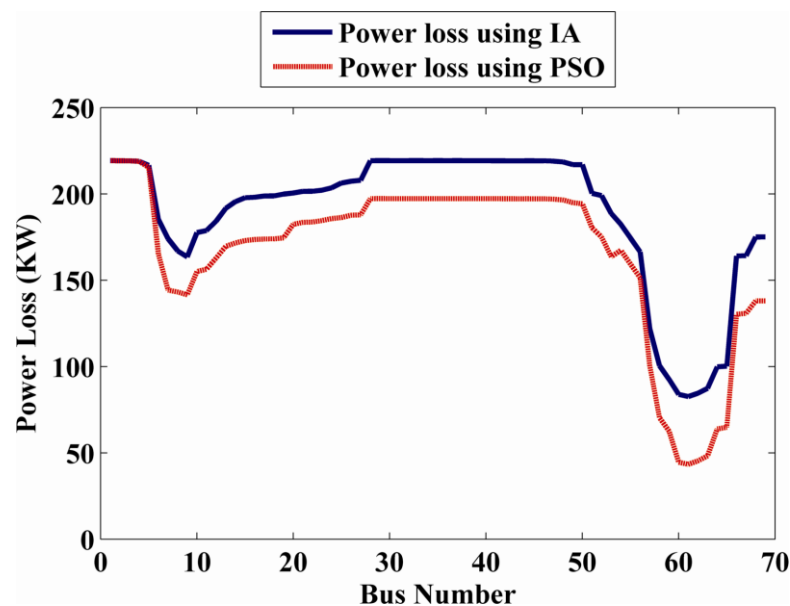


Figura 44 Comparativa pérdidas con IA y PSO

Tras esto el autor analiza el sistema mediante la tensión de cada nodo en los tres supuestos (sin GD, con GD optimizando con IA y con PSO). Como se puede apreciar en a figura 45 hay una gran diferencia de un sistema sin GD y con GD, la tensión sin GD llega a valores por debajo de 0,92 pu, esto incumple la condición de tensión del $\pm 5\%$ de la tensión nominal. Mientras que si optimizamos con GD habrá un mejor valor de tensión, pero si se compara los métodos se obtendrán mejores valores si se optimiza con PSO que si se hace con IA.

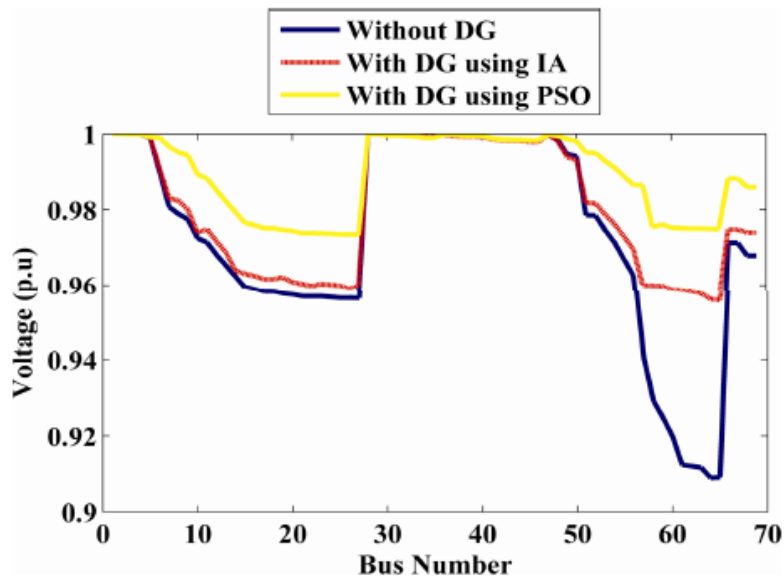


Figura 45 Comparativa de valores de tensión

4.4.1.2. Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation. [17]

- Objetivo

El autor intenta dar solución al problema de reconfiguración de una red en presencia de la generación distribuida (DG) con el objetivo de minimizar la pérdida de potencia y mejorar el voltaje en el sistema de distribución eléctrica.

- Modelo a optimizar

Se utiliza dos modelos de 33 nodos con una carga de 3715 KW y 2300KVAR y de 69 nodos con 3802,19 KW y 2694,06KVAR (similar del artículo 14). Además de tener dos sistemas de distribución, el autor realiza un estudio en tres modos de trabajo: ligero (0,5 nominal), nominal y sobrecargado (1,6 nominal). En ambos casos se ha hecho la simulación con MATLAB.

- Función objetivo y técnica empleada

La función objetivo es maximizar la disminución de pérdidas, como se aprecia en la fórmula 9.

$$f: \text{máximizar } (\Delta P_{Loss}^R + \Delta P_{Loss}^{DG}) \quad (9)$$

$$\text{Condiciones} \begin{cases} V_{min} \leq |V_k| \leq V_{max} \\ |I_{k,k+1}| \leq |I_{k,k+1,max}| \\ \sum_{k=1}^n P_{Gk} \leq \sum_{k=1}^n (P_k + P_{Loss,k}) \\ \begin{cases} \det(A) = 1 \text{ ó } -1 \text{ (sistema radial)} \\ \det(A) = 0 \text{ (sistema no radial)} \end{cases} \end{cases}$$

El método elegido es la técnica metaheurística de algoritmo de búsqueda armónica (HSA Harmony Search Algorithm).

Los sistemas son sometidos a cinco escenarios:

- Escenario I: El sistema está sin reconfigurar y sin generadores distribuidos (caso base);
- Escenario II: igual que el Escenario I, excepto que el sistema se reconfigura con la disposición de seccionamiento e interruptores (Smart Grid);
- Escenario III: igual que el Escenario I, excepto que las unidades de la GD se instalan en los buses candidatos en el sistema;
- Escenario IV: unidades de la GD se instalan después de reconfiguración de la red (Escenario II);
- Escenario V: Sistema con reconfiguración y la ubicación de las unidades de GD simultáneamente.

- Resultados y conclusiones

Los resultados son representados en sendas tablas dentro del artículo, donde se puede apreciar el estado del sistema en los cinco escenarios propuestos por el autor frente a los tres modos de trabajo (ligero, nominal y sobrecargado). Esto lo hace para los dos sistemas propuestos de 33 nodos y 69 nodos. Como cada escenario tiene condiciones distintas se va analizar los resultados por cada uno de ellos:

- Escenario I: Se trata del caso base para ambos sistemas, se calcula las pérdidas y los valores de tensión en cada nodo, siendo el valor mínimo el considerado como crítico

Los valores son muy malos, la tensión mínima es de 0,8529 pu (nodo 18) en el caso de 33 nodos y las pérdidas son de 575 KW siendo el sistema de 5944KW (9,67%) (se da cuando el sistema trabaja sobrecargado).

- Escenario II: El sistema de 33 nodos, se reconfigura mediante la apertura conmutadores abriendo 7, 14, 9, 32 y 37 consiguiendo que los valores de pérdidas se reduzcan en cerca de un 30% pero el valor de tensión crítico es de 0,8967 pu que se da en el nodo 32.

Mientras que en el sistema de 69 nodos, la reconfiguración no será la misma en los tres modos de trabajo del sistema, las pérdidas se llegan a reducir en un 58,40% y la tensión mínima pasa de 0,8445 (caso base) a 0,9048.

- Escenario III: La ubicación de las unidades de GD en el caso base serían:

En el sistema de 33 nodos, en el nodo 18, 17 y 33. Para todos los modos de trabajo, aunque variará su valor dependiendo de la carga del sistema. Las pérdidas se verán reducidas hasta un 54,63% en el caso de sobrecarga y la tensión crítica mejorará hasta 0,9437 pu en el nodo 29.

En el sistema de 69 nodos, su ubicación será en los nodos 63, 64 y 65, el valor varía dependiendo de la carga del sistema. Las pérdidas se reducen hasta un 64,66% en el caso de sobrecarga y el valor mínimo de tensión es de 0,9478 pu.

Como se puede apreciar los valores de tensión ya son muy aceptables y las pérdidas se han reducido considerablemente.

- Escenario IV: partiendo del escenario II se ubican las unidades de GD.

En el sistema de 33 nodos: en 30, 31 y 32. Teniendo distintos valores dependiendo de la carga del sistema. Con esto se reduce hasta un 54,87% las pérdidas y la tensión mínima es de 0,9140 pu (nodo 33).

En el sistema de 69 nodos: en 58, 60 y 61. Teniendo distintos valores dependiendo de la carga del sistema. Las pérdidas pueden reducirse hasta un 79,2% y su valor mínimo de tensión es de 0,9377pu.

Si se compara los escenarios III y IV, se observa que cuando se optimiza ubicando GD en el escenario I se consigue un mejor valor de tensión que cuando se ubica en el escenario II. A pesar de que el escenario IV es fruto de dos procesos de optimización primero reconfigurar mediante conmutadores y luego ubicando unidades de GD.

- Escenario V: Si se optimiza simultáneamente la reconfiguración y la ubicación de GD. Se obtiene:
En el sistema de 33 nodos que los conmutadores no actúan de la misma forma dependiendo de la carga que tenga el sistema pero si coincide la ubicación de las unidades de GD (nodos 31, 32 y 33). Las pérdidas se reducen hasta un 66,23% y la tensión crítica es de 0,9516 pu (nodo 14), pero que puede llegar a ser del 0,9859 pu.
En el sistema de 69 nodos, tanto la reconfiguración como la ubicación variarán dependiendo de la carga que tenga el sistema. Las pérdidas se reducirán hasta un 83,96% y el a valor mínimo de tensión será de 0,9592 pu, llegando a ser del 0,9860 pu.

El autor para cualificar el método metaheurístico, lo compara con otros dos, algoritmo genético (GA) y con algoritmo genético refinado (RGA) [28]. Somete a optimización a ambos sistemas pero en un único modo de trabajo. A las conclusiones que se llegan es que los valores obtenidos por HSA son mejores que con los otros dos.

4.4.1.3. Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm [18]

- Objetivo

El propósito es determinar la ubicación y tamaño óptimo de la unidad de GD, minimizando las pérdidas en

el sistema estudiado, de manera que se puede obtener un sistema más rentable energéticamente y fiable.

- El modelo a optimizar

Es un sistema de distribución planteado por el autor es de 69 nodos radiales propuesto por IEEE. Las cargas son de 3802,19 KW y 2694,6 KVAR, igual al artículo 14. El escenario varia y se incrementa la carga en un 50% (escenario II)

Ambos escenarios son sometidos a simulaciones.

- Función objetivo y técnica empleada

La función objetivo es la minimización de las pérdidas como se aprecia en la fórmula 10.

$$f: \min \sum_{i=0}^n \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \times r_{i+1} \quad (10)$$

Este artículo utiliza una técnica metaheurística poblacional, llamada colonia de abejas artificiales (ABC→ Artificial Bee Colony) [39]. Los dos escenarios son sometidos a cinco simulaciones donde se varía los parámetros del proceso de optimizado.

- Resultados y conclusiones

El método ABC demuestra que es rápido y robusto Rápido ya que el tiempo mayor en optimizar es de unos 6seg. Robusto porque a pesar de las pruebas a las que ha sido sometido los resultados son muy buenos. Y todo ello, con únicamente dos variables en la función objetivo. Se llega a reducir hasta el 97 % las pérdidas de potencia activa y el 92% las pérdidas de potencia reactiva. Para cualificar los resultados del método de optimización, los resultados son comparados a otras técnicas como son algoritmo genético y un método analítico.

El autor hace en primer lugar un muestreo donde compara el método con el valor exacto de optimización (primera simulación), se puede apreciar que todos los

valores coinciden, esto demuestra la exactitud del método metaheurístico.

4.4.1.4. Optimal Operation of Smart Grid in Isolated Island [19]

- Objetivo

Se optimizan los costes en una distribución siendo la red inteligente (Smart Grid) con unidades de GD que trabajan como islas.

- Modelo a optimizar

En este caso el sistema se trata 4 nodos trabajando independientemente. Los nodos tiene GD

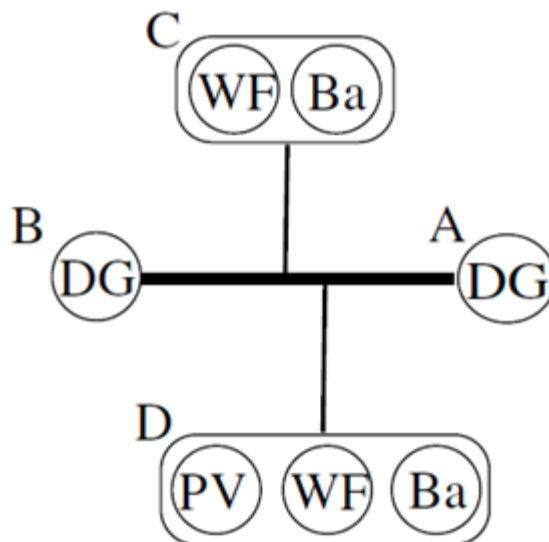


Figura 46 Sistema de microrredes

Donde hay aerogeneradores (WF), generadores fotovoltaicos (PV), baterías (Ba) y generadores diésel (DG).

El autor para aproximarse más a la realidad, refleja las limitaciones que tiene cada unidad de GD:

- Los generadores diésel, representa las curvas de rendimiento y calcula el coste en función de los KW producidos.

- Las baterías vienen limitadas por la carga y descarga de potencia.
- Los aerogeneradores y los generadores fotovoltaicos los relaciona con la climatología. Por esto hace tres simulaciones dependiendo del clima: soleado, nublado y lluvioso.
- Función objetivo y técnica empleada

La función objetivo será la minimización de los costes de operación de los generadores, como se observa en la fórmula 11.

$$\min Coste\ Total: \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [F_i(P_i(t)) \times I_i(t) + SC_i(t)] \quad (11)$$

El método utilizado es una combinación de búsqueda tabú y algoritmo genético. De forma que primero se hace una búsqueda tabú, analizando los resultados vecinos para obtener los mejores resultados para el algoritmo genético.

- Resultados y conclusiones

El autor para simplificar el proceso, considera que la carga es controlada y hace una aproximación que viendo los valores en la figura 47, se puede considerar valido ya que en ningún caso sale del umbral mínimo y máximo.

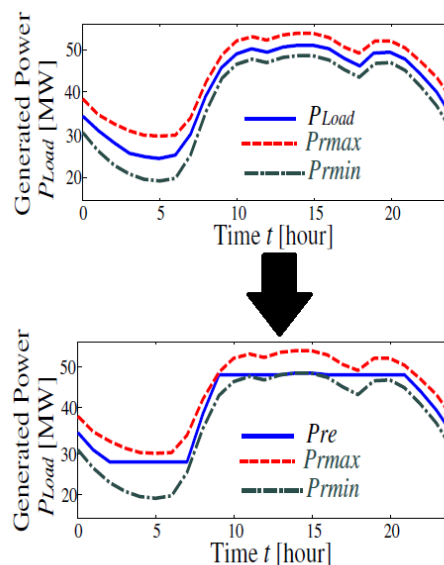


Figura 47 Aproximación de la carga

El autor para comparar el ahorro, calcula el coste de operación cuando los generadores son quienes asumen la carga y a continuación realiza el proceso de optimización, donde se obtienen los resultados del reparto de cargas teniendo en cuenta que el coste de producción sea mínimo, como se ha dicho anteriormente se optimiza el sistema con el tiempo soleado, nuboso y lluvioso.

	Coste (¥)	Reducción (%)
Solo generadores diésel	53.872.000	-
Día soleado	18.720.000	65,3
Día nuboso	19.850.000	63,2
Día lluvioso	20.394.000	62,1

Tabla 14 Resultado económico

Como se puede observar en la tabla 14, el coste cuando opera con reparto de cargas sin optimizar es de 53.872.000 ¥, realizando la optimización observamos que se ha reducido en más de un 60 % haga la climatología que haga: soleado se reduce en 65,3%, nuboso en 63,2% y lluvioso en 62,1%.

Cuando se optimiza el sistema, el único generador diésel que trabaja es el del nodo B, el resto no arranca en ningún momento del día por lo que el gasto se ve reducido considerablemente. Dependiendo de tipo de día hará que las unidades fotovoltaicas aporte más o menos potencia, haciendo que el generador diésel tenga que aportar más o menos potencia.

4.4.1.5. Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems[20]

- Objetivo

El autor pretende desarrollar una forma de optimización sistemática de un sistema de potencia con GD mediante la construcción de microrredes, ubicando unidades de DESRs (distributed energy storage resources, recursos distribuidos de almacenamiento de energía) y DRSs (distributed reactive sources, fuentes distribuidas de reactiva).

- Modelo a optimizar

Utiliza un sistema de PG&E 69 nodos de IEEE.

- Función objetivo y técnica empleada

El método para optimizar es la búsqueda tabú. Los criterios para optimizar, como bien dice son las pérdidas, ya que al minimizar las pérdidas, las variables como los costes, caída de tensión, etc... también se verán disminuidas

$$F_1 = \text{Pérdida anual} = \sum_{n=1}^N P_{Loss_n} \times \rho_n \times h_n \quad (12)$$

$$F_2 = \frac{a \times P_{index} + b \times Q_{index}}{(NoM-1)} \quad (13)$$

$$P_{index} = \sum_{k=1}^N |P_{ijk}| \times \rho_k$$

$$Q_{index} = \sum_{k=1}^N |Q_{ijk}| \times \rho_k$$

Para ubicar las unidades de GD, utiliza la función objetivo expresada en las fórmulas 12 y 13. Una vez hecho esto el autor propone cuatro escenarios:

- Escenario 1: Donde no hay unidades de DESRs ni DRSs
- Escenario 2: Sistema con DESRs únicamente
Se introduce DERs para minimizar el impacto de la posible discontinuidad de las energías renovables.

- Escenario 3: Sistema con DRSs únicamente
Se introduce DRSs para minimizar las pérdidas, la caída de tensión o para incrementar la capacidad del sistema.
- Escenario 4: Sistema con DESRs y DRSs
Se introduce para minimizar el desequilibrio entre consumo y generación.

- Resultados y conclusiones

El resultado de las divisiones es unas uniones llamadas virtuales donde el intercambio de potencia es mínimo. Los resultados de los cuatro escenarios son:

- Escenario 1: Donde no hay unidades de DESRs ni DRSs
El resultado se puede apreciar en la figura 48

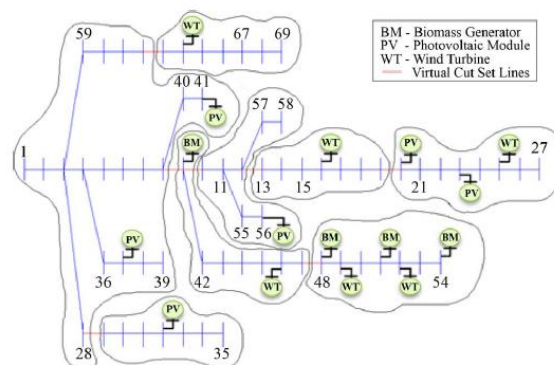


Figura 48 Microrredes escenario 1

- Escenario 2: Sistema con DESRs únicamente
El resultado se puede apreciar en la figura 49

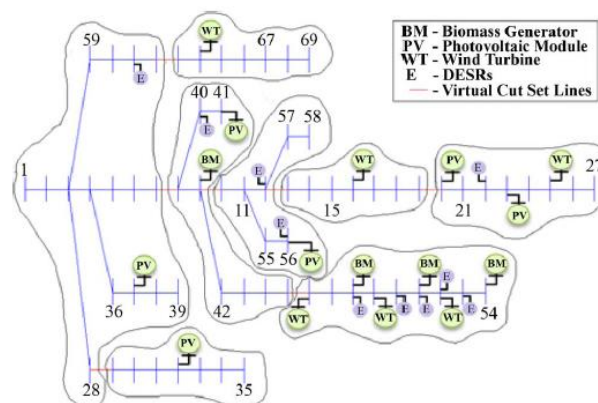


Figura 49 Microrredes y ubicación de DESRs - escenario 2

- Escenario 3: Sistema con DRSs únicamente
El resultado se puede apreciar en la figura 50

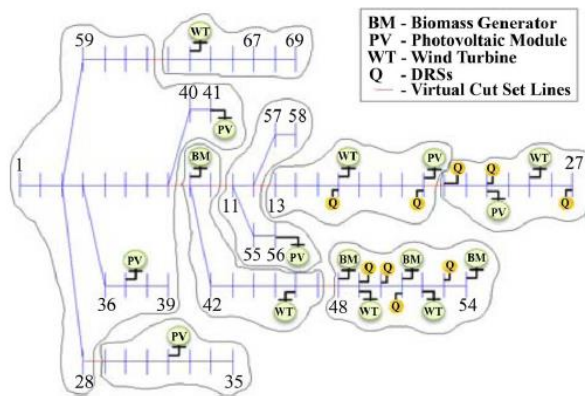


Figura 50 Microrredes y ubicación de DRSs - escenario 3

- Escenario 4: Sistema con DESRs y DRSs
El resultado se puede apreciar en la figura

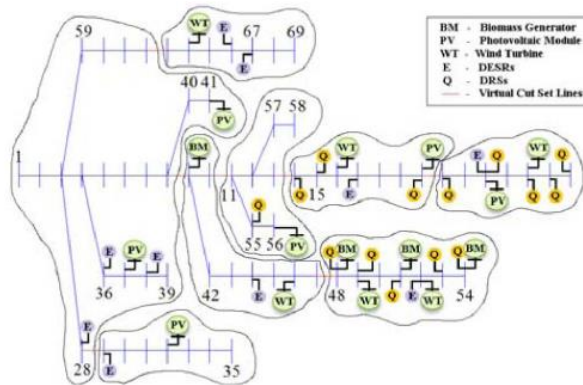


Figura 51 Microrredes y ubicación de DESRs y DRSs - escenario 4

Los resultados no son del todo concluyentes, la optimización del sistema se ha llevado a cabo con demasiadas unidades. Tampoco se puede cualificar los resultados ya que no se hace un control que permita comparar los resultados. Por estos motivos los autores proseguirán con los estudios en este campo y poco después redactaran el siguiente artículo [21].

4.4.1.6. Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security [21]

- **Objetivo**
Este artículo es un evolución de [20], es decir el objetivo es materializar un método sistemático de optimización de una red utilizando microrredes.
- **Modelo a optimizar**
Sigue usando PG&E 69 nodos de IEEE
- **Función objetivo y técnica empleada**
Esta vez el autor utiliza para optimizar una función objetivo compuesta por dos. En primer lugar F_1 que la define indicadores de fiabilidad como:

SAIFI: es un indicador de fiabilidad en servicios de energía eléctrica, se trata de un promedio de interrupciones que un cliente podría experimentar.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{N_T} \begin{cases} \lambda_i \rightarrow \text{tasa de fracaso} \\ N_i \rightarrow n^{\circ} \text{ clientes por ubicación} \\ N_T \rightarrow \text{clientes totales} \end{cases} \quad (14)$$

SAIDI: es un indicador de fiabilidad en servicios de energía eléctrica, se trata de la duración media de interrupción

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{N_T} \begin{cases} U_i \rightarrow \text{tiempo de interrupción anual} \\ N_i \rightarrow n^{\circ} \text{ clientes por ubicación} \\ N_T \rightarrow \text{clientes totales} \end{cases} \quad (15)$$

MAIFI: es un indicador de fiabilidad en servicios de energía eléctrica, se trata de un promedio de interrupciones momentáneas que un cliente podría experimentar en un tiempo determinado (normalmente un año).

$$MAIFI = \frac{\sum \lambda_{mi} N_{Li}}{N_T} \begin{cases} \lambda_{mi} \rightarrow n^o \text{ de fallos} \\ N_{Li} \rightarrow n^o \text{ clientes por ubicación} \\ N_T \rightarrow \text{clientes totales} \end{cases} \quad (16)$$

$$F_1 = W_1 \times \frac{SAIFI - SAIFI_{Opt}}{SAIFI_{Opt}} + W_2 \times \frac{SAIDI - SAIDI_{Opt}}{SAIDI_{Opt}} + W_3 \times \frac{MAIFI - MAIFI_{Opt}}{MAIFI_{Opt}} \quad (17)$$

La segunda función es la seguridad de suministro. No solo lo relaciona con la potencia activa sino que tiene en cuenta la potencia reactiva.

$$\begin{aligned} F_2 &= K_{2p} \times F_{2p} + K_{2q} \times F_{2q} = \\ &= K_{2p} \times \sum_{i=1}^{NoM} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{nbusi} \left| P_{G_{i,j,k}} - P_{L_{i,j,k}} (1 + 0,05)^2 \right|^2 \times \rho_i + \\ &K_{2q} \times \sum_{i=1}^{NoM} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{nbusi} \left| Q_{G_{i,j,k}} - Q_{L_{i,j,k}} (1 + 0,05)^2 \right|^2 \times \rho_i \quad (18) \end{aligned}$$

Por lo que la función objetivo del artículo será:

$$Min(F), F = K_1 \times F_1 + K_2 \times F_2 \quad (19)$$

El método utilizado para optimizar será el de búsqueda tabú.

- Resultados y conclusiones

En el proceso de optimización da valores a K_1 y K_2 valores de 0 y 1. De esto modo hace la optimización exclusivamente con los indicadores de fiabilidad, luego con seguridad de suministro únicamente y más tarde con ambas. El resultado se puede apreciar en la figura 52

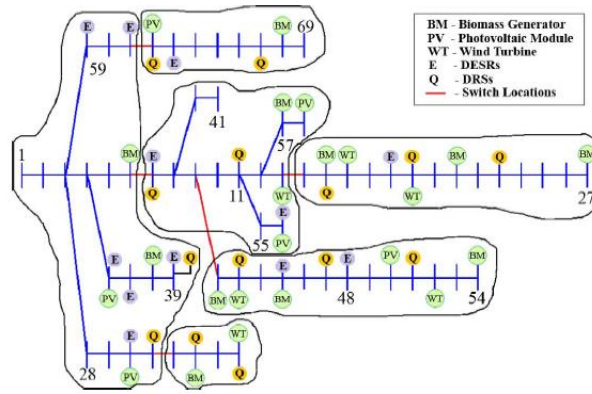


Figura 52 Microrredes y ubicaciones de GD

Comparando el resultado de la optimización se observa que el sistema tiene un número menor de unidades de GD, el proceso de optimización depende de la fiabilidad y de la seguridad de suministro. Por lo que el autor desarrolla un nuevo artículo [22].

4.4.1.7. DG Mix, Reactive Sources and Energy Storage Units for Optimizing Microgrid Reliability and Supply Security[22]

- Objetivo

En este artículo, el autor hace una combinación de los métodos empleados en los artículos [20] y [21]

- Modelo a optimizar

Vuelve a utilizar el sistema PG&E 69 nodos de IEEE.

- Función objetivo y técnica empleada

A parte de las funciones utilizadas anteriormente el autor introduce un nuevo índice, llamado índice del bienestar del sistemas (SWB, system well-being) que utiliza los índices citados anteriormente (SAIFI,SAIDI y MAIFI) y otros índices que aparecen en [21], SWB se puede expresar como se muestra en la fórmula 20.

$$SWB = \left[1 - 0,5 \cdot \left(\frac{|I_R - I_{RT}|}{I_{RT}} + \frac{|I_S - I_{ST}|}{I_{ST}} \right) \right] \cdot 100 \quad (20)$$

Siendo $I_R = F_1$ en la ecuación 17 y $I_S = F_2$ en la ecuación 18

$$I_R = W_1 \times \frac{SAIFI - SAIFI_{opt}}{SAIFI_{opt}} + W_2 \times \frac{SAIDI - SAIDI_{opt}}{SAIDI_{opt}} + W_3 \times \frac{MAIFI - MAIFI_{opt}}{MAIFI_{opt}}$$

$$I_S = \sum_{i=1}^{NoM} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{nbus_i} \left| P_{G_{i,j,k}} - P_{L_{i,j,k}} (1 + 0,05)^2 \right|^2 \times \rho_i +$$

$$\sum_{i=1}^{NoM} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{nbus_i} \left| Q_{G_{i,j,k}} - Q_{L_{i,j,k}} (1 + 0,05)^2 \right|^2 \times \rho_i \quad (21)$$

Como en artículos anteriores el autor utiliza como método de optimización la búsqueda tabú.

- Resultados y conclusiones

El sistema es sometido a distintos procesos

- Colocación de las diferentes unidades de GD para minimizar las pérdidas anuales y diseñar las microrredes para un sistema de distribución interconectado maximizando SWB.

Con este diseño el SWB tiene un valor de 77% mientras que si no hubiese GD tendría un 23%.

- Diseñar de manera simultánea la colocación de unidades de GD y las microrredes maximizando SWB.

En este caso se obtiene un valor de SWB del 80%, si no hubiese GD se llegaría al 28%. Por lo que si se compran ambos resultados cuando se optimiza el diseño de microrredes y la ubicación de GD simultáneamente se obtiene mejores resultados.

Para ver la robustez del sistema el autor hace 2 simulaciones: variando las cargas y la generación de manera controlada y dando valores aleatorios a la GD.

- Ubicación de DRSs en las microrredes para maximizar SWB.
El resultado se puede apreciar en la figura 53

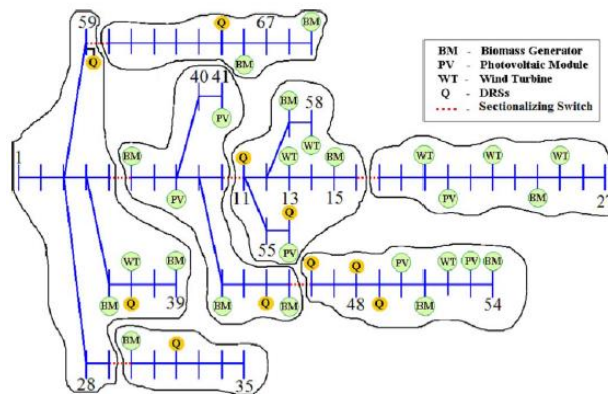


Figura 53 Microrredes con DRSs

Se llega a lograr un valor de SWB del 92% pero como bien menciona el autor la capacidad óptima sería de 350 KVAR y ahí el valor de SWB es de 89%.

- Ubicación de DESRs en las microrredes para maximizar SWB.
El resultado se puede apreciar en la figura 54

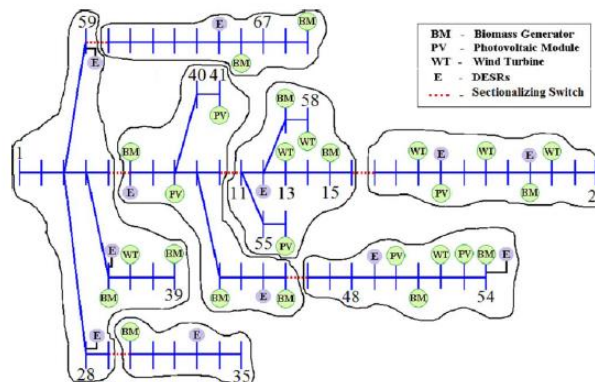


Figura 54 Microrredes con DESRs

Como en el caso anterior aunque se llega a obtener un SWB del 80,3%, el resultado óptimo (figura 54) es cuando el valor de potencia de DESRs es de 350 KW. El resultado de SWB en este caso sería de 79,9%.

- Diseñar de manera simultánea la ubicación de DRSs y DERs en las microrredes maximizando SWB.

La optimización calcula modelos donde la SWB tiene valores del pero no es el caso óptimo ya que hay demasiados elementos. El autor comenta que el modelo óptimo es cuando DRSs vale 400KVAR y DESRs 250 KW, en este sistema el valor de SWB es de 91% (figura 55).

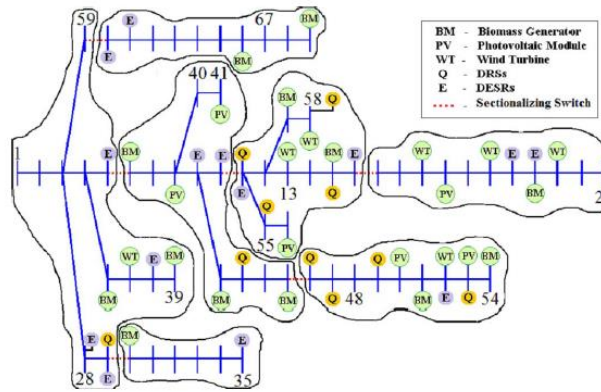


Figura 55 Microrredes con DRs y DESRs

Con estos procesos de optimización se pasa de tener un SWB del 80% al 91% cuando se introducen elementos de DRs y DESRs. En la primera optimización se garantiza un sistema fiable y con seguridad de suministro, con este segundo se garantiza un sistema muy robusto.

Por lo que demuestra que el sistema de optimización es un método muy a tener en cuenta, el dividir un sistema grande en subgrupos (microrredes) que interactúan entre sí está normalizado en la norma IEEE 1547.4 [23] El motivo es facilitar el control y la operación del sistema.

4.4.1.8. Unbalanced three-phase distribution state estimation using cooperative particle swarm optimization [24]

- Objetivo

El objetivo es concretar la estimación del estado de distribución (DSE→distribution state estimation) de un sistema con gestión avanzada (DMS- distribution management system) de 123 nodos desequilibrado. Además el sistema tiene cargas y generación variable.

- Modelo a optimizar

Se trata de un sistema desequilibrado de 123 nodos con DMS, que es una colección de aplicaciones diseñadas para supervisar y controlar toda la red de distribución eficiente y fiable.

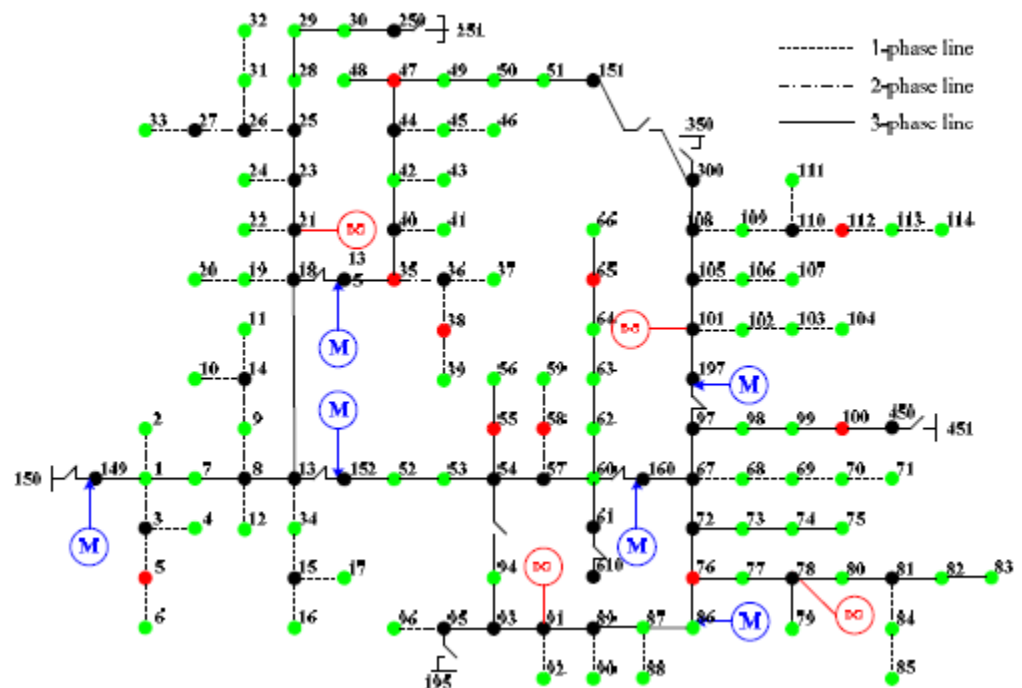


Figura 56 Sistema de 123 nodos desequilibrados

El voltaje nominal es de 4,16KV y los elementos de generación son variables y se encuentran en la tabla 15

Nodo	Tipo de generación	Potencia activa (KW)	Factor de potencia	Desviación
21	Fotovoltaica	300	0.95	15%
78	Fotovoltaica	300	0.95	15%
91	Viento	450	0.95	15%
101	Viento	450	0.95	15%

Tabla 15 Unidades de GD

Mientras que las cargas variables están en la tabla 16, donde se indica los valores de potencia y su desviación.

Nodo	Potencia activa cada fase (KW)	Potencia reactiva en cada fase (KVAr)	Desviación
5	[0, 0, 20]	[0, 0, 10]	20%
35	[40, 0, 0]	[20, 0, 0]	15%
38	[0, 20, 0]	[0, 10, 0]	20%
47	[35, 35, 35]	[25, 25, 25]	20%
55	[20, 0, 0]	[10, 0, 0]	25%
58	[0, 20, 0]	[0, 10, 0]	20%
65	[35, 35, 70]	[25, 25, 50]	30%
76	[105, 70, 70]	[80, 50, 50]	25%
10	0 [0, 0, 40]	[0, 0, 20]	25%
112	[20, 0, 0]	[10, 0, 0]	20%

Tabla 16 Cargas variables

Las cargas se identifican fácilmente en la figura 56, están indicadas en color rojo.

- Función objetivo y técnica empleada

La función objetivo es minimizar la diferencia entre el valor medido por DSE y el calculado, como se puede apreciar en la fórmula 22.

$$f: \text{minimizar} \sum_{j=1}^{n_x} \omega_j \left[\frac{z_j - h_j(x)}{z_j} \right]^2$$

$$\text{Siendo} \begin{cases} P_s = P_e + I_b^2 \cdot R_b \\ I_b^2 = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} = \frac{P_e^2 + Q_e^2}{U_e^2}, \forall b \in 1, 2, \dots, b_n \\ Q_s = Q_e + I_b^2 X_b \end{cases} \quad (22)$$

Donde x es un vector que incluye la potencia de carga y de generación, z_j es el valor medido, ω_j es el factor de ponderación medido por la variable h_j(x).

El método propuesto es el algoritmo de optimización enjambre de partículas cooperativa (Co-PSO) basado en el algoritmo de optimización enjambre de partículas. Los resultados de las pruebas y son comparados con otros algoritmos evolutivos de optimización tales como PSO, algoritmos PSO mejoradas, algoritmo genético (GA).

- Resultados y conclusiones

Los resultados calculados utilizando el método de co-PSO están mostrados en la tabla 17

Nodo	Tipo de generación	Potencia activa (KW)	Potencia real (KW)
21	Fotovoltaica	300	299,79
78	Fotovoltaica	300	298,11
91	Viento	450	446,43
101	Viento	450	447

Tabla 17 Potencia generada real

El resultado de la potencia estimada se compara con la medida en la tabla 18.

Nodo	Potencia medida cada fase (KW)	Potencia consumida estimada
5	[0, 0, 20]	[0, 0, 20.01]
35	[40, 0, 0]	[39.99, 0, 0]
38	[0, 20, 0]	[0, 20.01, 0]
47	[35, 35, 35]	[34.97, 34.96, 35.97]
55	[20, 0, 0]	[19.98, 0, 0]
58	[0, 20, 0]	[0, 20.05, 0]
65	[35, 35, 70]	[35.07, 35.08, 70.08]
76	[105, 70, 70]	[104.29, 69.25, 69.20]
10	0 [0, 0, 40]	[0, 0, 40.01]
112	[20, 0, 0]	[20.03, 0, 0]

Tabla 18 Carga real

El tiempo necesario ha sido 281 seg. Como en otros casos anteriores el autor para cualificar el resultado lo compara con otros métodos de optimización, en este caso todos son técnicas metaheurísticas. Para compararlos utiliza dos variables:

- MIRE (Maximum Individual Relative Error)
- MIAE (Maximum Individual Absolute Error)

$$MIRE(\%) = \max \left(\frac{|X_{est}(i) - X_{real}(i)|}{|X_{real}(i)|} \right) \cdot 100$$

(23)

$$MIAE(\%) = \max(|X_{est}(i) - X_{real}(i)|) \quad (24)$$

Los resultados de la comparación se pueden ver en la tabla 21 el método que mejores resultados obtiene es el propuesto por el autor (Co-PSO) con apenas un error de 0,63 % en ambos casos

(MIRE y MIAE), en segundo lugar los valores son muy próximos pero el peor método con diferencia sería GA con un error del 14,07%. Como se muestra en la tabla 19

Algoritmo	MIRE (%)		MIAE (%)	
	Valor	Localización	Valor	Localización
PSO	1.75	78	1.75	78
GA	14.07	78	14.07	78
GA-PSO	2.76	78	2.76	78
MPSO	1.41	101	2.11	101
SA-PSO	1.53	78	1.53	78
Chaos-PSO	1.26	78	1.26	78
Co-PSO	0.63	78	0.63	78

Tabla 19 Resultado comparación métodos

Algoritmo	Tiempo (s)
PSO	195
GA	278
GA-PSO	283
MPSO	221
SA-PSO	563
Chaos-PSO	776
Co-PSO	281

Tabla 20 Tiempo empleado

También se compara el tiempo de resolución, tabla 20, aquí podemos ver que el método Chaos-PSO tarda mucho más que el resto, cuatro veces más que PSO. Los tiempos de resolución son aceptables desde unos 3 min en el caso de PSO hasta casi 5 min en el caso de co-PSO.

El artículo demuestra que las técnicas metaheurísticas son muy válidas para analizar el comportamiento de sistemas. Y demuestra la importancia en la elección de la técnica metaheurística, para valorar la calidad del resultado siempre tenemos que tener métodos de control, en este caso el autor utiliza otras técnicas metaheurísticas y compara los resultados.

4.4.2. Comparativa entre técnicas

Algunos artículos tienen como objetivo la comparación de varios métodos metaheurísticos, optimizan un sistema y miden tiempos, iteraciones necesarias, desviaciones, etc... así se puede comparar resultados y determinar cuál método se comporta de mejor manera. El artículo [25], se puede observar en sus resultados en la tabla 21.

Método	33 Nodos		83 Nodos	
	Tiempo total	Iteraciones	Tiempo total	Iteraciones
GA	8,056	76	30,526	181
RGA	7,411	65	27,415	170
SA	6,852	159	22,061	2643
ACO	6,439	42	19,736	124
HBMO	6,001	33	17,104	103
HSA	3,274	71	9,871	178
Método propuesto	10,83	4	37,983	27

Tabla 21 Tiempos e iteración en optimización

Se puede llegar a varias conclusiones, dependiendo del método de optimización tendremos que realizar más o menos iteraciones para conseguir un resultado satisfactorio, pero sí que es cierto que hay métodos tan complejos que cada iteración tarda casi más que otros métodos en calcular el resultado, si vemos el método propuesto por el autor. Hace 4 iteraciones y tarda 10,830 seg. es decir,

$$10,830/4 = 2,708 \text{ seg/iter.}$$

Por lo que si lo comparamos con HSA que

tarda 3,274 seg en hacer 71 iteraciones, es un proceso mucho más costoso.

Mientras que en [25] mide tiempo e iteraciones para conseguir el resultado óptimo en [30] podemos ver como fija el número de iteraciones, para analizar el tiempo y la calidad del resultado.

Método	Óptimo	Desviación	Nº iteraciones
GA	53.632	21.735	200
ACO	49.565	0.3454	200
PSO	50.45	0.41	200
DE	52.51	1.51	200
TS	52.32	1.32	200

Tabla 22 Solución de óptimo y desviación

Se puede observar fácilmente que el algoritmo de hormigas (ACO) no solo es el que mejores resultados tiene sino que es el más rápido seguido muy de cerca el algoritmo de nube de partículas (PSO). Si primamos la calidad del resultado el siguiente en tener en cuenta sería búsqueda tabú (TS) pero con el problema que supone que el tiempo de resolución sea el doble que el de ACO y PSO. En penúltimo lugar podemos colocar al método genético, evolución diferencial (DE) los resultados en comparación con ACO y PSO no son del todo buenos y el tiempo es mucho mayor. Por último lugar el algoritmo genético es el que peor resultados presenta y el tiempo de resolución es mayor que los dos métodos con mejores resultados.

Comparando ya dos artículos podemos ver que el método de colonia de hormigas es bastante fiable y rápido, pero el artículo [29] data del 2006 y compara técnicas que podríamos llamar tradicionales, desde entonces ha habido evoluciones, como podemos ver en [30].

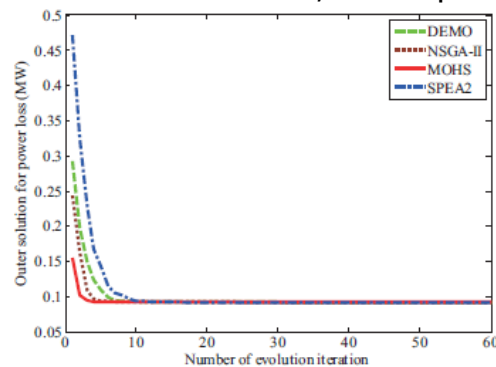


Figura 57 Comparativa de métodos metaheurísticos

Una vez concluido el artículo se puede ver en la figura 57 que el número de iteraciones podría haber sido mucho menor.

Observando la gráfica se puede ver que el método MOHS (Multi-Objective Harmony Search) es el que alcance el punto óptimo con menor número de iteraciones, en este artículo el autor no facilita tiempos, pero como ya hemos visto anteriormente [24] el método de búsqueda armónica tenía un tiempo bajo. En el caso de la optimización de la desviación de voltaje el resultado se consigue con mucho menos iteraciones que el resto de métodos, por lo que cabe destacar este método de optimización (MOHS). El resto de métodos tienen resultados en número de iteraciones similares aunque se podría hacer una clasificación.

El siguiente método sería NSGA –II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) [31], seguido de DEMO (Differential Evolution for Multi-

Objetivo) y por último SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2).

5. Conclusiones

Teniendo en cuenta el objetivo del PFC, que era analizar la aplicación de técnicas metaheurísticas para optimizar una red de distribución con generación distribuida. Se seleccionó ocho artículos, fruto de estudios científicos. Observando los resultados de todos ellos se puede afirmar que la inclusión de la GD en sistemas de distribución eléctrica aporta muchísimas ventajas, además es un tema que se está tratando ampliamente. Las posibles incertidumbres (corriente reversible, control de estabilidad del sistema, etc...) van desapareciendo según se va investigando, multitud de países han elegido que la estructura de su sistema de distribución eléctrica debe tener GD. Minimiza pérdidas y aumenta la fiabilidad, lo que se traduce en ahorro de costes. Como todo despliegue de equipamiento hay que afrontar una fuerte inversión pero como se vio en este PFC, dicha inversión se amortiza rápidamente, incluso si solo se toma en cuenta el ahorro por las pérdidas.

Además de las ventajas que supone en cuestiones de pérdidas hay que sumarle que la energía eléctrica que se obtiene en GD la gran mayoría proviene de fuentes ecológicas, el sol y el viento son recursos que en nuestro país son abundantes. Si se hiciese un fuerte desarrollo de estos métodos de generación, seríamos menos dependientes energéticamente hablando, lo que se traduciría en una mayor estabilidad económica.

Por otro lado la tendencia es tener una red cada vez más inteligente (Smart Grid), que se adecue a los hábitos de los consumidores y que puedan ofrecer mayores opciones comerciales, en este aspecto la GD es una gran baza en su desarrollo.

Para que la instalación de GD sea rentable, hay que optimizar los recursos. Como se ha demostrado en este PFC, la utilización de técnicas metaheurísticas es un gran acierto, son herramientas fiables y precisas, ahorran tiempo y recursos. Lo importante es elegir adecuadamente la función objetivo, para que los resultados sean los deseados, además si elige una técnica metaheurística robusta y sencilla, obtendremos resultados fiables y en poco tiempo. Para poder cualificar los resultados siempre se tiene que establecer un proceso de control, esto se hace para valorar la calidad del resultado. Se

puede fijar ese control del resultado ya sea sabiendo la solución exacta o aplicando diferentes métodos de optimización y comparar sus resultados.

6. Bibliografía

[1] Ministerio de Industria, Energía y Turismo (MIET)
<http://www.minetur.gob.es>

[2] Protocolo de Kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático

[3] Renewables Global Status Report 2015- <http://www.ren21.net/>

[4] Comisión Nacional de Energía (CNE)

[5] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers and Operation Research

[6] Osman y Kelly (Osman, I.H. and Kelly, J.P. (eds.). Meta-Heuristics: Theory and Applications, Boston USA Ed. Kluwer Academic, (1996)

[7] S. Kirkpatrick, J.C.D. Gelatt and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. Science (1983)

[8] N. Metropolis, M. Rosenbluth, A. Teller and E. Teller. Equation of state calculations by fast computing machines. Journal of Chemical Physics (1953)

[9] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computer and Operations Research. (1986)

[10] F. Glover and M. Laguna. Tabu Search. Kluwer Academic Publisher. 1997

[11] R. Martí. Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria. Matematicas (2000)

[12] N. Mladenovic and P. Hansen. A variable neighborhood algorithm. A new metaheuristic for combinatorial optimization. In Abstract for Paper presented at Optimization Days. (1995)

[13] H.R. Lourenço, O.C. Martin and T. Sützle. Iterated Local Search. Kluwer Academic Publisher (2003)

[14] W. El Khatam, Y. Hegazy and M.M.A. Salama, "Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1674-1684, Aug. 2004.

[15] BOE

[16] Samir Dahal, Hossein Salehfar. "Optimal Location and Sizing of Distributed Generators in Distribution Networks" 978-1-4799-1255-1/13/2013 IEEE

[17] R. Srinivasa Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. V. L. Narasimham "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation". IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 28, NO. 1, FEBRUARY 2013. Pag 317-325

[18] Fahad S. Abu-Mouti and M. E. El-Hawary "Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm". IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 26, NO. 4, OCTOBER 2011. Pag 2090-2101

[19] Bungo Asato, Tomonori Goya, Kosuke Uchida, Atsushi Yona and Tomonobu Senjyu. "Optimal Operation of Smart Grid in Isolated Island". 978-1-4244-7398-4/10/2010 IEEE 1100-1104

[20] S. A. Arefifar, Y. Abdel-Rady I. Mohamed y Tarek H. M. El-Fouly "Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems". IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 3, NO. 3, SEPTEMBER 2012 pag 1491-1502

[21] S. A. Arefifar, Y. Abdel-Rady I. Mohamed y Tarek H. M. El-Fouly "Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security" IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 4, NO. 3, SEPTEMBER 2013 pag 1567-1575

[22] S. A. Arefifar, Y. Abdel-Rady I. Mohamed y Tarek H. M. El-Fouly "DG Mix, Reactive Sources and Energy Storage Units for Optimizing Microgrid Reliability and Supply Security" IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 5, NO. 4, JULY 2014 pag 1835-1844

[23] Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems

[24] Ke-yan Liu, Wanxing Sheng y Kaiyuan He "Unbalanced three-phase distribution state estimation using cooperative particle swarm Optimization" 978-1-4799-3656-14/4/2014 IEEE

- [25] H. R. Esmailian and R. Fadaeinedjad "Energy Loss Minimization in Distribution Systems Utilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation". IEEE SYSTEMS JOURNAL, 2014 pag 1-10
- [26] G. J. Peponis, M. P. Papadopoulos, and N. D. Hatziaargyriou, "Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses," in Proc. Joint Int. Power Conf. APT, Sep. 1993, vol. 2, pag. 601-605.
- [27] T. Niknam, "An efficient multi-objective HBMO algorithm for distribution feeder reconfiguration," Exp. Syst. Appl., vol. 38, no. 3, pp. 2878-2887, Mar. 2011.
- [28] R. S. Rao, S. V. L. Narasimham, M. R. Raju, and A. S. Rao, "Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1080-1088, Aug. 2011
- [29] J. Z. Zhu, "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm," Elect. Power Syst. Res., vol. 62, no. 1, pp. 37-42, May 2002.
- [30] J. Olamaie, y T. Niknam "Daily Volt/Var Control in Distribution Networks with Regard to DGs: A Comparison of Evolutionary Methods" 0-7803-9525-5/06/2006 IEEE.
- [31] Yuan Liu, Yunhua Li, Ke-yan Liu, Wanxing Sheng "Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation in Distribution Power System Based on Multi-Objective Harmony Search Algorithm". 978-1-4799-1201-8/13/2013 IEEE
- [32] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Trans. on Evolutionary Computation, vol. 6, n. 2, pp. 182-197, 2002.
- [33] H. Singh, "Introduction to game theory and its application in electric power markets," IEEE Computer Application in Power, Vol. 12, Issue 4, Oct. 1999, pp. 18-20.

[34] Kwee-Bo and Sim, Gi-Yoonkim, "Solution of multi-objective optimization problems: co evolutionary algorithm based on evolutionary game theory," school of electrical engineering, artificial life and robotics, 2004, pp. 174-185.

[35] Theodore L.turocy, B.von Stengel, "Game theory," CDAM research Report lse-CDAM, 2001.

[36] E. Zitzler, L. Thiele, "Multi-objective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.3, No. 4, Nov. 1999, pp. 257-271.

[37] K. Pokharel, M. Mokhtar, J. Howe "A SPEA2 Based Planning Framework for Optimal Integration of Distributed Generations" 2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition, 2012. Pag 387-392

[38] K. Pokharel, M. Mokhtar, J. Howe "A Multi-Objective Planning Framework for Optimal Integration of Distributed Generations" 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)

[39] R. S. Maciel, A. Padilha-Feltrin "Distributed Generation Impact Evaluation Using a Multi-objective Tabu Search" 978-1-4244-5098-5/09/2009 IEEE

[40] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," en Tech. Rep. TR06. Kayseri, Turkey: Dept. Comput. Eng.,Erciyes Univ., 2005.

[41] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan,"A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, pp. 182–197, 2002.

[42] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele, "SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm," Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich Switzerland, TIK Report 103, 2001.

[43] D. Karaboga, "An Idea Based On Honey Bee Swarm For Numerical Optimization : Technical Report-TR06," Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering

[44] B. Basturk and D. Karaboga, "An Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Numeric Function Optimization n," in IEEE Swarm Intelligence Symposium, Indianapolis, USA May 12-14, 2006.

[45] A. Afshara, O. Bozorg Haddada, M.A. Mariño, c, B.J. Adams, "Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation" J. Franklin Inst. Volume 344, Issue 5, August 2007, Pages 452–462

[46] Z. W. Geem, "Novel derivative of harmony search algorithm for discrete design variables," Appl. Math. Computat., vol. 199, no. 1, pp. 223–230, 2008.

[47] Z. Woo Geem, J. Hoon Kim, "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search" SIMULATION February 2001